

INHALTSVERZEICHNIS

1 Zusammenfassung	3
2 Einleitung	4
3 Einsatzmaterial.....	5
3.1 Kriterien zur Beurteilung.....	5
3.1.1 Größe, Form und Größenverteilung	6
3.1.2 Wassergehalt.....	7
3.1.3 Der Heizwert.....	9
3.1.4 Chemische Zusammensetzung.....	11
3.1.5 Klassifizierung nach der Herkunft	14
3.2 Herstellung, Transport und Lagerung von Holzhackschnitzeln	16
3.2.1 Herstellung und Transport	17
3.2.2 Lagertechniken und Einfluss der Lagerung auf die Holzqualität.....	18
4 Feuerungstechnische Grundlagen	21
4.1 Verbrennungsvorgang.....	21
4.2 Feuerungsleistung	23
4.3 Einfluss des Brennstoff-Feuchtegehaltes	23
5 Anlagentechnik	24
5.1 Feuerungsarten.....	24
5.1.1 Rostfeuerung	24
5.1.2 Unterschubfeuerung	28
5.1.3 Unterschubfeuerung mit Außenrost	31
5.1.4 Mischform zwischen Unterschub- und Rostfeuerung	32
5.1.5 Kurz-Vorschubrost mit Rotationsbrennkammer (Sonderbauform)	33
5.1.6 Einblasfeuerung.....	34
5.1.7 Vorofenfeuerung.....	34
5.1.8 Wirbelschichtfeuerung (zirkulierende)	35
5.1.9 Schachtfeuerung.....	35
5.1.10 Gegenüberstellung der Hauptfeuerungsarten	35
5.2 Optionale Zusatzausrüstungen für Feuerungsanlagen	36
5.3 Optimierung der Ausbrandbedingungen.....	37
5.4 Regelungstechnik	38
5.4.1 Unterdruckregelung	39
5.4.2 Leistungsregelung	40
5.4.3 Verbrennungsregelung	41
6 Luftreinhaltechnik.....	47
6.1 Schadstoffbildung	47
6.1.1 Kohlenmonoxid	47
6.1.2 Kohlenwasserstoffe	48
6.1.3 Dioxine und Furane	48
6.1.4 Stickstoffoxide	48
6.1.5 Schwefeldioxid.....	49
6.1.6 Partikel- bzw. Staubemissionen	49
6.1.7 Ruß.....	50

6.1.8	Teer.....	50
6.1.9	Geruchsstoffe	50
6.2	Primärmaßnahmen zur Minderung der Schadstoffemissionen	51
6.2.1	Minderung von Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff-, Dioxin- und Furanemissionen	51
6.2.2	Minderung von Stickstoffoxidemissionen	53
6.2.3	Minderung von Staub bzw. Partikelemissionen	54
6.3	Sekundärmaßnahmen zur Minderung der Schadstoffemissionen.....	55
6.3.1	Entstaubung der Abgase	55
7	Siloplanlagen.....	64
7.1	Unterflursilos	65
7.2	Hochsilo	66
7.3	Siloustragsysteme.....	67
7.4	Geruchsbildung bei Holzhackschnitzelsilos	69
7.5	Sicherheitstechnische Anforderungen.....	70
8	Zusammensetzung und Entsorgung von Holzaschen bzw. Rückständen aus Rauchgaskondensationsanlagen	72
8.1	Einleitung	72
8.2	Zusammensetzung der Asche.....	73
8.3	Zusammensetzung des Kondensatschlammes	76
8.4	Verwertung und Beseitigung von Holzaschen	77
8.4.1	Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht	77
8.4.2	Verwertung in der Landwirtschaft und im Forst	80
8.4.3	Zuschlagstoffe für mineralische Baustoffe	81
9	Kosten und Wirtschaftlichkeit.....	82
10	Literaturverzeichnis	85
11	Glossar	89

1 Zusammenfassung

Die Nutzung von Holz als regenerativem und weitgehend CO₂-neutralem Brennstoff gewinnt vor allem aus Gründen des Klimaschutzes eine immer größere Bedeutung. Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit Holzhackschnitzel-Heizanlagen zur energetischen Nutzung von naturbelassenem Holz. Dabei stützt sie sich im Wesentlichen auf die Auswertung vorliegender Veröffentlichungen und Berichte.

Als gasreicher Festbrennstoff nimmt Holz feuerungstechnisch eine Sonderstellung unter den Brennstoffen ein. Die schadstoffarme Verbrennung von Holz stellt deshalb hohe Anforderungen an die einzusetzende Anlagentechnik und an die einzuhaltenden Betriebsbedingungen. Der schadstoffarme Betrieb ist aber eine wichtige Voraussetzung für eine breite Marktdurchdringung von Holzfeuerungsanlagen.

In der Studie werden zunächst die Eigenschaften des Brennstoffes Holz erläutert. Nach der Beschreibung der feuerungstechnischen Grundlagen folgt eine Übersicht über Aufbau, Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Typen von Feuerungsanlagen-systemen. Weiter werden Zusatzausrüstungen und begleitende Maßnahmen zur Optimierung der Feuerung vorgestellt.

Im Hinblick auf die Minimierung der Umweltauswirkungen werden die Vorkehrungen zur Begrenzung von Emissionen dargestellt. Diese umfassen u. a. die steuerungstechnische Optimierung des Verbrennungsvorgangs und den Einsatz von Abgasreinigungsanlagen.

Abschließend werden Hinweise zum Bau und Betrieb von Siloanlagen für die Lagerung von Holzhackschnitzeln sowie zur Entsorgung der Rückstände aus der Verbrennung und der Abgasreinigung gegeben. Der Einfluss unterschiedlicher Abgasreinigungssysteme auf die Wärmegestehungskosten wird exemplarisch gezeigt.

2 Einleitung

Der globale Temperaturanstieg in der Atmosphäre innerhalb der nächsten Jahrzehnte wird von wissenschaftlicher Seite nicht mehr in Frage gestellt. Der Klimaschutz ist deshalb eine der größten umweltpolitischen Herausforderungen. Innerhalb der Europäischen Union hat sich die Bundesrepublik verpflichtet, zur Erfüllung des Kyoto-Klimaprotokolls vom 10.12.1997 die Treibhausgasemissionen bis 2008/2012 um 21% gegenüber 1990 zu reduzieren. Weiter hat sich Deutschland verpflichtet, über die internationale Klimarahmenkonvention von Kyoto hinaus die CO₂-Emissionen bis 2005 gegenüber dem Stand von 1990 um 25% zu senken. Bei CO₂-Emissionen von rund einer Milliarde Tonnen im Jahre 1990 bedeutet dies eine absolute Reduktion des Jahresausstoßes an CO₂ um etwa 250 Millionen Tonnen gegenüber dem Stand von 1990. Dies ist nur durch eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen möglich.

Neben der Energieeinsparung kommt dabei der Substitution von fossilen Brennstoffen durch regenerative Energieträger eine besondere Bedeutung zu. In waldreichen Gebieten ist Holz ein wesentlicher Brennstofflieferant. Holz ist der traditionsreichste und von den Menschen am längsten genutzte Energieträger. Lediglich in den Industrieländern wurde das Holz durch den verstärkten Einsatz fossiler Energieträger (Öl und Gas) weitgehend verdrängt. Weltweit deckt Holz ca. 10 % des Primärenergieverbrauchs und hat damit auch heute noch eine größere Bedeutung als die Kernenergie.

Mit der Diskussion um steigende CO₂-Konzentrationen in der Erdatmosphäre wurde der Ruf nach der energetischen Nutzung von Holz auch in den Industriestaaten wieder lauter, denn die Nutzung von Holz als Energieträger ist in der Gesamtbilanz als weitgehend CO₂-neutral anzusehen. Bei der Verbrennung von Holz wird lediglich die Menge an CO₂ freigesetzt, die zuvor während des Wachstums in der Pflanze gebunden wurde. Außerdem ist Holz bei nachhaltiger Waldbewirtschaftung auf unbegrenzte Zeit verfügbar. Der Einsatz von Holz als regenerativer Brennstoff schont damit auch die fossilen Energiereserven der Erde.

Unter den beschriebenen Gesichtspunkten werden heute immer mehr Holzhackschnitzel-feuerungsanlagen im Rahmen von Nahwärmekonzepten zur Versorgung von Neubaugebieten oder größeren kommunalen Objekten betrieben.

Die vorliegende Studie stellt die wesentlichen Fachinformationen über Holzhackschnitzel-feuerungsanlagen in kompakter und übersichtlicher Form zusammen und soll damit Kommunen und kommunale Betriebe sowie Industrie- und Gewerbebetriebe bei der Entscheidung über den Bau und bei der Anlagenkonzipierung unterstützen. Außerdem soll sie eine Informationsquelle für Genehmigungs- und Überwachungsbehörden darstellen.

3 Einsatzmaterial

3.1 Kriterien zur Beurteilung

Die chemisch-stofflichen sowie physikalischen Merkmale von Holzhackschnitzeln sind von entscheidender Bedeutung für deren Lagerungsbeständigkeit, die Einbringung des Brennstoffs in den Brennraum, die Verbrennungsführung, die Korrosionsanfälligkeit der Feuerungsanlage sowie für die Emissionen und die Aschequalität (Tabelle 3-1).

Qualitätsmerkmal	Wichtigste Auswirkung
Chemisch-stoffliche Merkmale:	
Wassergehalt	Lagerfähigkeit, Heizwert, Verluste, Selbstentzündung
Heizwert	Brennstoffausnutzung, Anlagenauslegung
Elementgehalte: Cl N S K Mg, Ca, P Schwermetalle	HCl-, Dioxin/Furanemissionen NO _x -, HCN- und N ₂ O-Emissionen SO _x -Emissionen Korrosion an Überhitzerflächen, Senkung des Ascheerweichungspunktes Erhöhung des Ascheerweichungspunktes, Beeinflussung der Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung Schadstoffemissionen, Ascheverwertung
Aschegehalt	Partikelemission, Rückstandsverwertung bzw. -entsorgung
Ascheerweichungspunkt	Anlagenbetriebssicherheit, Niveau des Schadstoffausstoßes
Pilzsporen	Gesundheitsrisiken bei Brennstoffhandhabung
Physikalische Merkmale:	
(Lager-)Dichte	Transport- und Lageraufwendungen, Logistikplanung
Teilchen- bzw. Einzeldichte	Feuerungseigenschaften (spezifische Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate)
Größenverteilung	Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Betriebssicherheit in der Förderung, Trocknungseigenschaften, Staubbildung
Feinanteil (bei Presslingen)	Lagerdichte, Transportverlust, Staubbildung
Abriebfestigkeit (bei Presslingen)	Qualitätsänderung beim Materialumschlag, Entmischung, Feinanteil

Tabelle 3-1: Qualitätsmerkmale von Hackschnitzeln und ihre wichtigsten Auswirkungen bei der thermischen Nutzung (aus [Har97]).

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels sollen die für die Verbrennung wichtigen Eigenschaften von Holzhackschnitzeln näher erläutert werden.

Eine Normierung für Hackgut gibt es bisher nur in Österreich (ÖNorm M7133). In Tabelle 3-2 sind die wesentlichen Parameter dieser Norm dargestellt.

A) Hackgutklasse	Zulässige Massenanteile und jeweilige Bandbreite für Teilchengröße (Siebanalyse) in mm				zulässige Extremwerte für Teilchen	
	max. 20 %	60 – 100 %	max. 20 %	max. 4 %	max. Querschnitt	max. Länge
G 30	> 16	16 – 2,8	2,8 – 1	< 1	3 cm ²	8,5 cm
G 50	> 31,5	31,5 – 5,6	5,6 – 1	< 1	5 cm ²	12 cm
G 100	> 63	63 – 11,2	11,2 – 1	< 1	10 cm ²	25 cm

	Hackgutklasse	Klassengrenzen	Erläuterungen
B) Wassergehaltsklassen: (Wassergehalt bezogen auf feuchte Masse)	W 20	< 20 %	„lufttrocken“
	W 30	20 – 30 %	„lagerbeständig“
	W 35	30 – 35 %	„beschränkt lagerbeständig“
	W 40	35 – 40 %	„feucht“
	W 50	40 – 50 %	„ernte frisch“
C) Schüttdichteklassen: (Angaben für wasserfreien Zustand)	S 160	< 160 kg/m ³	„geringe Schüttdichte“
	S 200	160 – 250 kg/m ³	„mittlere Schüttdichte“
	S 250	> 250 kg/m ³	„hohe Schüttdichte“
D) Aschegehaltsklassen:	A 1	> 1 %	„geringer Aschegehalt“
	A 2	1 – 5 %	„erhöhter Aschegehalt“

Tabelle 3-2: Zusammenstellung der Grenzwerte und Bedingungen für die Zuordnung zu den österreichischen Hackgutklassen nach ÖNorm M7133 aus [Mar99].

3.1.1 Größe, Form und Größenverteilung

Holzhackschnitzel sind etwa quaderförmig. Die ÖNorm M7133 unterscheidet zwischen Fein-, Mittel- und Grobhackgut entsprechend den Querschnitten < 3 cm², < 5 cm² und < 10 cm².

Eine Beschränkung des Feinanteils bei Holzhackschnitzeln (Kantenlänge < 0,5 mm) ist aus Gründen der Anlagenzuverlässigkeit und des Anlagenschutzes dringend erforderlich. So kann z. B. ein zu hoher Feinanteil bei Schneckenförderern Verstopfungen auslösen. Außerdem können die Feinanteile bei Rostfeuerungen durch die Primärluft mitgerissen werden und in den nachgeschalteten Anlagenteilen verpuffen. Dies kann zur Beschädigung der Feuerungsanlage führen [Mar98]. Weiter senkt ein erhöhter Feinanteil den Ascheerweichungspunkt, d. h. die Asche fängt auf Grund ihrer größeren Oberfläche schneller an zu schmelzen. Dies sollte jedoch unbedingt verhindert werden, da hierdurch der notwendige Ascheaustrag zumindest behindert, wenn nicht sogar unterbunden wird.

Wegen der bisher in Deutschland fehlenden Brennstoffnormierung ist gegebenenfalls bereits der Hackschnitzellieferant hinsichtlich einer Beschränkung des Feinanteils, z. B. durch Absieben der Holzhackschnitzel, vom Betreiber einer Holzhackschnitzelfeuerung vertraglich zu verpflichten. Ein Absieben erst an der Heizanlage ist in den meisten Fällen nicht möglich.

Der Feinanteil wird maßgeblich vom gewählten Holzmaterial bestimmt. So haben Holzsortimente mit hohem Rinden-, Blatt- oder Nadelanteil – z. B. Heckenschnitt aus der Landschaftspflege in den Sommermonaten – einen erhöhten Feinanteil.

In Tabelle 3-3 sind die möglichen Verbrennungs- und Einbringungstechniken für die jeweiligen Hackgutgrößen nach [Obe97] dargestellt. Für Wirbelschichtfeuerungen ist weiterhin eine Beschränkung des Fremdstoffanteils (Steine, Glas, Metall) auf 0,2 % zu beachten.

Max. Partikelgröße	Geeignete Fördereinrichtung	Geeignete Feuerungstechnologie
<5 mm	Einblasvorrichtung	Einblasfeuerung, Muffelfeuerung, zirkulierende Wirbelschichtfeuerung
<50 mm	Schneckenförderer	Unterschubfeuerung, Rostfeuerung, stationäre und zirkulierende Wirbelschichtfeuerung
<100 mm	Vibrationsrinnen, Trogkettenförderer	Rostfeuerung, stationäre Wirbelschichtfeuerung

Tabelle 3-3: Beispiele für geeignete Brennstoff-Fördereinrichtungen und Feuerungsanlagen für Schüttgut unterschiedlicher Größe nach [Obe97].

3.1.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt (w) ist definiert als das Gewicht der im Holz enthaltenen Wassermenge im Verhältnis zum Gewicht des feuchten Holzes: $w = (G_w - G_o) / G_w$, mit G_w : Gewicht des Holzes bei w % Wassergehalt, G_o : absolutes Trockengewicht (= Darrgewicht).

Alternativ kann die Holzfeuchte (u) angegeben werden. Sie ist definiert als das Gewicht der im Holz enthaltenen Wassermenge im Verhältnis zum Gewicht des absolut trockenen Holzes: $u = (G_u - G_o) / G_o$, mit G_u : Gewicht des Holzes bei u % Wassergehalt.

Der Wassergehalt von frisch geschlagenem Holz liegt zwischen 37 und 56 % und ist von der Holzart abhängig. In Tabelle 3-4 sind typische Wassergehalte verschiedener Baumarten aufgelistet.

Baumart	Kern	Splint	Gesamt
Fichte	57 – 64	16 – 30	45 - 46
Tanne	58 – 67	23 – 33	55

Kiefer	51 – 68	18 – 33	48
Lärche	50 – 60	21 – 35	37
Strobe	68	28	48
Douglasie	54	22 – 27	-
Buche	50	50	40
Eiche	46	45	46

Tabelle 3-4: Wassergehalte (von - bis in %) verschiedener Baumarten (waldfrisch) nach [LWF99].

Der Wassergehalt von Holzhackschnitzeln hängt stark von der Herkunft und der Lagerungsdauer ab. Typische Werte für die Wassergehalte von Holzhackschnitzeln aus unterschiedlichen Quellen sind in Tabelle 3-5 aufgeführt.

Sortiment	w	u
Schnitzel aus dem Wald	20-50	25-100
Schnitzel trocken gelagert	20-30	25-43
Schnitzel lufttrocken (min. 2 Jahre Lagerung)	15-20	18-25
Sägenebenprodukte	25-60	33-150
Restholz aus Zimmerei	13-20	15-25
Restholz aus Schreinerei	7-17	8-20

Tabelle 3-5: Wassergehalte (w) und entsprechende Feuchten (u) von Hackschnitzeln unterschiedlicher Herkunft aus [For98].

Der Wassergehalt bzw. die Holzfeuchte kann mit Hilfe verschiedener Methoden bestimmt werden. So ist z. B. der Wassergehalt einer Probe durch Messung des Feuchtgewichts und des absoluten Trockengewichts nach DIN 52 183 bestimmbar. Dabei wird die erforderliche Trocknung in einem Ofen bei Temperaturen zwischen 100 und 120 °C durchgeführt. In der Praxis werden hier oft Mikrowellenöfen eingesetzt. Diese Methode liefert recht zuverlässige Ergebnisse.

Die Holzfeuchte kann durch Messung der Leitfähigkeit bestimmt werden, die sich mit zunehmendem Feuchtegehalt im Holz erhöht. Bei Feuchtegehalten über 30 %, was einem Wassergehalt von > 25 % entspricht, ist diese Methode jedoch auf Grund erhöhter Messgenauigkeit nicht mehr anwendbar [Mar99].

Die Kenntnis von Wassergehalt bzw. Holzfeuchte ist für die Betreiber von Feuerungsanlagen besonders wichtig, da diese Parameter maßgeblich die Verbrennungsbedingungen beeinflussen. So kann Holz nur bis zu einer bestimmten maximalen Feuchte verbrannt werden.

Hohe Wassergehalte im Brennstoff führen bei der Verbrennung zu folgenden Problemen [Ber99]:

- Mit steigender Brennstofffeuchte wird der Wärmeumsatz einer Anlage verringert, und es wird zunehmend schwieriger, die gewünschte Wärme bereitzustellen.
- Im Teillastbetrieb kann die ideale Verbrennungstemperatur nicht mehr erreicht werden. Hierdurch verschlechtert sich der Ausbrand der Abgase, und die Emissionen von CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen steigen.
- Eine Erhöhung des Brennstoffumsatzes ist zwar durch eine Steigerung der Primärluftzufuhr möglich, jedoch erhöhen sich damit auch die Stickoxidemissionen.

Zusätzliche Probleme ergeben sich auch durch stark schwankende Wassergehalte in den angelieferten Holzhackschnitzeln. In einem Fernwärmewerk im dänischen Felding wurde z. B. über zwei Jahre hinweg der Wassergehalt der eingesetzten Holzhackschnitzel untersucht [Cen95]. Die ermittelten Wassergehalte lagen hier zwischen 21 % und 70 %.

3.1.3 Der Heizwert

Der Heizwert von absolut trockenem Holz ist, bezogen auf das Gewicht, für alle Holzsorten nahezu konstant. Unterschiede ergeben sich dagegen im volumenbezogenen Heizwert, da sich die Dichten einheimischer Hölzer bis zu einem Faktor 2 unterscheiden. In Tabelle 3-6 sind die Dichten und die gewichtsbezogenen Heizwerte für verschiedene Holzsorten bei einem Wassergehalt von 13 % aufgetragen. Der Heizwert von absolut trockenem Holz liegt bei etwa 5,1 kWh/kg.

	Baumart	Rohdichte [kg/m ³]	Heizwert H_u [kWh/kg]
1	Robinie	647	4,1
2	Esche	564	4,2
3	Eiche	561	4,2
4	Ulme	556	4,1
5	Rotbuche	554	4,0
6	Ahorn	522	4,1
7	Lärche	487	4,3
8	Kiefer	431	4,4
9	Douglasie	412	4,4
10	Pappel	377	4,1
11	Fichte	377	4,5
12	Tanne	332	4,5

Tabelle 3-6: Dichte und Heizwert verschiedener heimischer Hölzer bei einem Wassergehalt von 13 % aus [For98].

Der Heizwert von Holz hängt maßgeblich vom Wassergehalt ab. Dies gilt vor allem für den gewichtsbezogenen Heizwert. So steckt in einem Kilo Holz mit einem Wassergehalt von 50 % nur halb soviel Energie wie in einem Kilo absolut trockenen Holzes. Hinzu kommt, dass für die Verdampfung des Wassers während des Verbrennungsprozesses Energie aufgewendet werden muss, die in den meisten Fällen auch nicht wieder zurückgewonnen werden kann und damit durch den Schornstein entweicht. Bisher sind nur wenige Anlagen mit Rauchgaskondensationsanlagen zur Rückgewinnung der Kondensationsenergie ausgestattet.

Betrachtet man den volumenbezogenen Heizwert, so ergibt sich ein etwas anderes Bild. In einem Schüttraummeter Holz ist, unabhängig vom Wassergehalt, die gleiche Menge an Trockensubstanz und somit an Energie enthalten. Ein geringerer unterer Heizwert ergibt sich nur auf Grund der aufzuwendenden Verdampfungswärme. Eine Änderung des Wassergehalts um 1 % ändert den volumenbezogenen Energiegehalt damit nur um etwa 0,25 %. Diese Tatsache ist wichtig für die Bestimmung des Warenwertes der angelieferten Holzhackschnitzel. Üblicherweise wird nach Schüttraummetern abgerechnet. Vor allem in kleineren Anlagen, welche automatisch beschickt werden und bei denen regelmäßige Kontrollen der Brennstoffqualität zu kostspielig wären, ergeben sich damit zuverlässigere energiebezogene Rohstoffpreise als bei einer gewichtsbezogenen Abrechnung. Allerdings wird mehr und mehr dazu übergegangen, den Lieferanten nur die tatsächlich vom Brennstoff freigesetzte Wärmemenge zu vergüten (Feststellung durch Wärmemengenzähler an der Anlage). Damit bleibt das Risiko vollständig beim Lieferanten und somit auch das Eigeninteresse, möglichst hochwertigen und trockenen Brennstoff zu liefern. In Tabelle 3-7 sind Wassergehalt, Brennwert, unterer Heizwert, Schüttdichte und Energiedichte für verschiedene Holzbrennstoffe und für Heizöl EL zusammengefasst.

	Wassergehalt [Gew% d. FS]	Brennwert [kWh / kg TS]	Unterer Heizwert [kWh / kg FS]	Schüttdichte [kg FS / m³]	Energiedichte [kWh / m³]
Holzpellets	10,0	5,5	4,6	600	2.756
Hackgut - Hartholz - vorgetrocknet	30,0	5,5	3,4	320	1.094
Hackgut Hartholz	50,0	5,5	2,2	450	1.009
Hackgut - Weichholz - vorgetrocknet	30,0	5,5	3,4	250	855
Hackgut - Weichholz	50,0	5,5	2,2	350	785
Heu (Dauerwiese) - Hochdruckballen	18,0	5,1	3,8	200	750
Rinde	50,0	5,6	2,3	320	727
Triticale (Ganzpflanzen) - Hochdruckquaderballen	15,0	5,2	4,0	175	703
Sägespäne	50,0	5,5	2,2	240	538
Stroh (Winterweizen) - Hochdruckquaderballen	15,0	5,2	4,0	120	482
Heizöl EL	0,0	12,7	11,9	860	10.200

Tabelle 3-7: Brennwerte, Wassergehalte, untere Heizwerte, Schüttdichten und Energiedichten von Biomassefestbrennstoffen im Vergleich zu Heizöl nach [Obe97].

3.1.4 Chemische Zusammensetzung

Holz lässt sich bezüglich der chemischen Bestandteile grob in naturbelassenes und behandeltes Holz unterteilen. Je nach der Schadstoffbelastung des Holzes sind bei der Genehmigung von Holzfeuerungsanlagen unterschiedliche Anforderungen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz und seinen Verordnungen zu berücksichtigen. Abbildung 3-1 gibt hierüber einen Überblick.

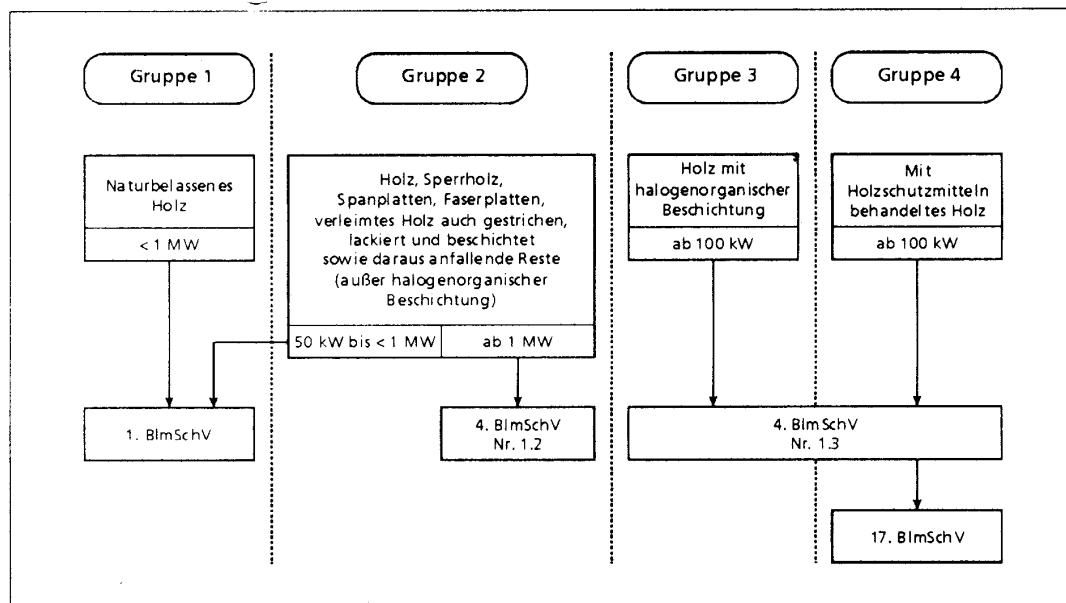


Abbildung 3-1: Einsatzmöglichkeiten und Einteilung von Holz in vier Brennstoffgruppen (aus [Hof96]).

Die wichtigsten Bestandteile von Holz sind Cellulose (60 bis 90 %) und Lignin (10 bis 40 %). Diese für holzartige Pflanzen typischen organischen Verbindungen mit hohem Sauerstoffanteil liefern zum großen Teil die bei der Verbrennung freiwerdende Energie. Holz enthält außerdem 2 bis 12 % Harze, Wachse, Farbstoffe sowie in geringem Umfang Stickstoff, Schwefel und Chlor. In Tabelle 3-8 ist die durchschnittliche Elementzusammensetzung (ohne Schwermetalle) von Buchen- und Fichtenholz bzw. –rinde wiedergegeben.

	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [mg/kg]	Cl [mg/kg]	Asche [%]
Fichtenholz	50,3	6,2	43,1	0,2	50	< 30	0,4
Buchenholz	49,0	6,1	44,3	0,3	70	50	0,5
Fichtenrinde	52,6	6,0	39,0	0,6	630	90	1,8
Buchenrinde	50,1	5,8	40,9	0,5	790	160	2,6

Tabelle 3-8: Elementarzusammensetzung verschiedener Hölzer nach [Mar99].

Der bei der Verbrennung der Hölzer und Rinden anfallende Ascheanteil ist ebenfalls aufgeführt. Er sollte möglichst gering sein, um die Beanspruchung der Entaschungs-einrichtung zu minimieren. Des Weiteren ist Asche ein unerwünschtes Koppelprodukt, dessen Entsorgung für den Betreiber oft mit zusätzlichen Kosten verbunden ist.

Tabelle 3-9 zeigt die Konzentrationsbandbreiten von Spurenstoffen in naturbelassenem Holz (Schwermetalle, Halogene, Stickstoff, Schwefel) [Mar 1999]

Element	Wert in mg/kg Trockengewicht Holz
Arsen (As)	< 0,5 - 1
Blei (Pb)	0,5 - 5
Chlor (Cl)	10 - 100
Chrom (Cr)	< 0,5 - 5
Fluor (F)	0,5 - 30
Kupfer (Cu)	< 0,5 - 5
Quecksilber (Hg)	< 0,5
Stickstoff (N)	2000 - 5000
Schwefel (S)	100 - 400

Tabelle 3-9: Konzentrationsbandbreiten der bei der Verbrennung wichtigen Spurenstoffe in naturbelassenem Holz [Mar99].

In den Abbildungen 3-2 bis 3-5 sind die durchschnittlichen Werte sowie die möglichen Bandbreiten der Konzentrationen von Schwefel, Stickstoff und Chlor sowie der Aschegehalte in Holzsortimenten verschiedener Herkunft nach [Obe97] dargestellt.

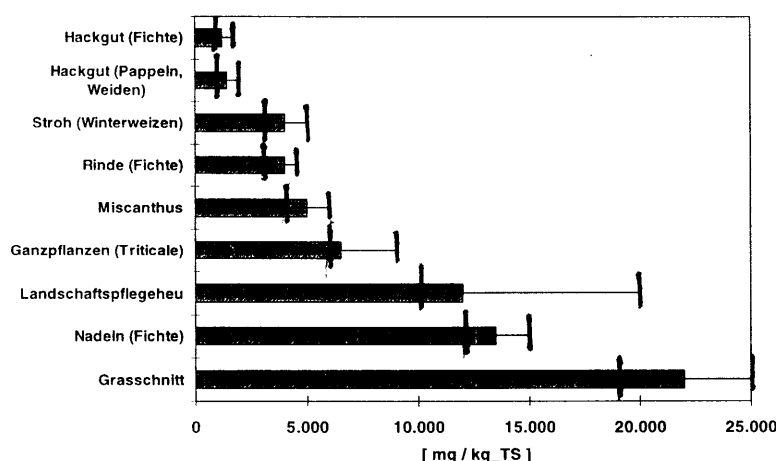


Abbildung 3-2: Stickstoff (N)-Gehalte von Biomasse-Brennstoffen und Schwankungen nach [Obe97]

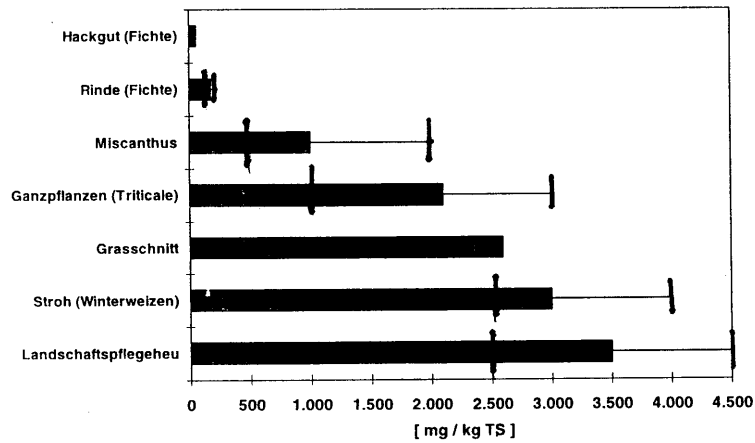


Abbildung 3-3: Chlor (Cl)-Gehalte von Biomasse-Brennstoffen und Schwankungen nach [Obe97]

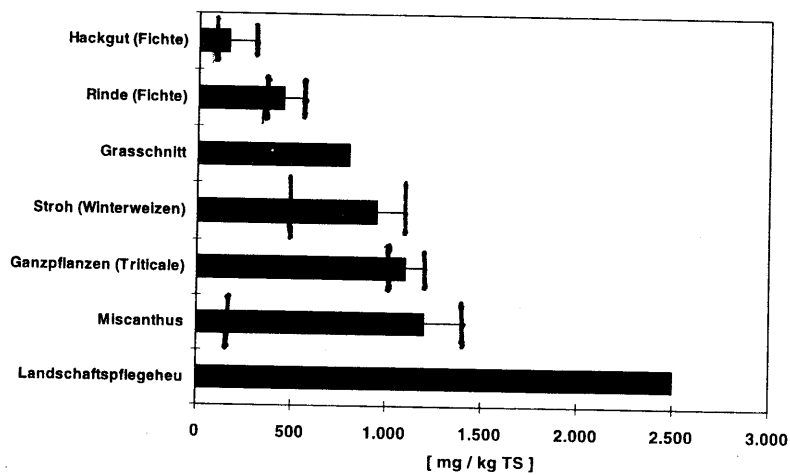


Abbildung 3-4: Schwefel (S)-Gehalte von Biomasse-Brennstoffen und Schwankungen nach [Obe97]

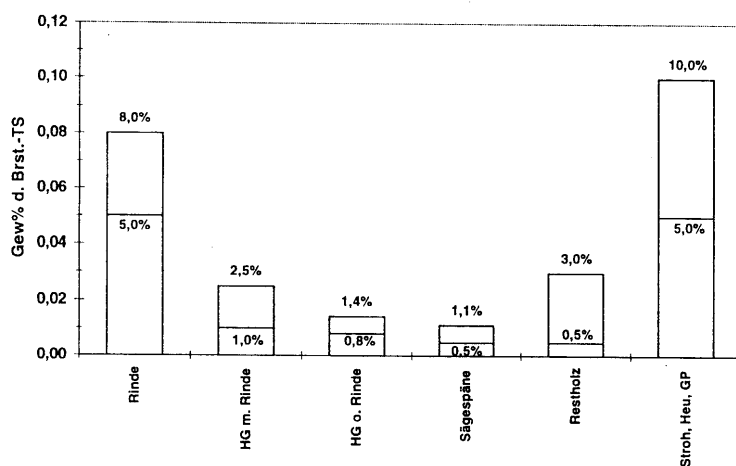


Abbildung 3-5: Aschengehalte von Biomasse-Brennstoffen und Schwankungen nach [Obe97]

3.1.5 Klassifizierung nach der Herkunft

Die Klassifizierung von Holz nach der Herkunft lässt Schlüsse auf die chemische Zusammensetzung zu:

- **Waldholz**

Im Zusammenhang mit Holzhackschnitzeln versteht man darunter sämtliche aus dem Wald entnommenen Hölzer, welche nach der Lagerung und nach dem Transport direkt zu Hackschnitzeln verarbeitet werden. Waldholz gilt stets als naturbelassen.

- **Sägerestholz**

Beim Sägen anfallende Reststoffe wie Sägemehl, Schwarten, Rinde und Spreiße sind als naturbelassen einzustufen.

- **Produktionsreste aus der Holzbearbeitung und -verarbeitung**

Die Produktionsreste aus diesen Bereichen sind oft mit Leim, Bindemitteln und Lacken behaftet und können somit nicht mehr als naturbelassen eingestuft werden. Die thermische Nutzung derartiger Hölzer beschränkt sich daher auf Feuerungsanlagen der holzbe- und -verarbeitenden Industrie (bis 1 MW immissionsschutzrechtlich genehmigungsfrei) oder auf immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Holzfeuerungsanlagen zur allgemeinen Wärmeversorgung.

- **Altholz (=Gebrauchtholz) und Industrierestholz**

Unter Altholz versteht man all jene Holzprodukte, die „verbraucht“ und für den ursprünglichen Zweck nutzlos geworden sind (z.B. Fenster, Bauholz, Transportkisten usw.). Eine gesicherte Einordnung derartiger Holzsortimente in die in Abbildung 3-1 gezeigten Gruppen ist wegen der stark schwankenden Schadstoff-belastung von Althölzern kaum möglich. Bei den heute üblichen Aufbereitungs- und Sortierverfahren kann nicht ausgeschlossen werden, dass Altholz unbekannter Herkunft mit Holzschutzmitteln belastet ist.

Industrierestholz fällt als Produktionsrückstand bei der Holzbe- und -verarbeitung an. Es handelt sich um meist unbehandelte stückige Holzteile wie Holzschnitzel, Kappholz oder Ablängstücke aus Massivholz, Schwarten und Spreiße. Industrierestholz fällt vor allem bei Zimmereien, Schreinereien, Möbel- und Fertighausherstellern an [BIZ00].

- **Landschaftspflegeholz und sonstige holzartige Biomasse**

Bei der Pflege von Straßenbegleitflächen, Natur- und Landschaftsschutzgebieten, Parks und Grünanlagen fallen Äste, eventuell noch mit Nadeln oder Blättern, an. Derartige

Holzsortimente sind in der Regel in die Gruppe der naturbelassenen Hölzer einzuordnen und werden zunehmend thermisch verwertet. Ebenfalls bei der Landschaftspflege anfallende Biomasse mit geringem Holzanteil, wie z. B. Gräser, Wiesenpflanzen und Strauchschnitt, wird derzeit in Baden-Württemberg nicht thermisch verwertet. Bei der thermischen Verwertung von Landschaftspflegematerial aus Straßennähe stellt sich die Frage, ob die Kfz-Emissionen zu einer erhöhten Schadstoffkonzentration führen können. Mögliche Wege der Kontamination von Pflanzen neben Straßen sind dabei:

1. Ablagerung von Stäuben und den darin enthaltenen Schadstoffen (Organika und Schwermetalle) auf der Pflanzenoberfläche.
2. Aufnahme von Schadstoffen aus der Luft über die Pflanzenöffnungen durch Atmung
3. Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden über die Wurzeln.

Nach [Rös96] ist der dominierende Mechanismus der Kontaminierung die Ablagerung und Anhaftung von Stäuben an Blätter, Nadeln, Äste und Gras. Dabei korreliert der Schadstoffgehalt der Pflanzen mit der Verkehrsdichte und dem Abstand von der Fahrbahn. Es wurde ein exponentielles Absinken der Konzentrationen mit zunehmendem Fahrbahnabstand festgestellt.

Neben diesen qualitativen Beschreibungen existieren nur wenige Messdaten zu Schadstoffkonzentrationen von Pflanzen in Straßennähe. Im Rahmen der Studie „Vergleich stofflicher und energetischer Wege zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen“ [Rös96] wurde Laub und Mähgut von Straßenbegleitflächen auf Schadstoffe untersucht. Es konnten gegenüber unbelasteten Gebieten signifikant erhöhte Werte von Schwermetallen festgestellt werden (Tabelle 3-10). Der Bleigehalt im Straßenlaub dürfte sich jedoch heute bereits wieder dem des unbelasteten Laubgemisches verwendet wird.

	Pb	Cd	Cu	Cr	Ni	Zn
Straßenlaub ^{a)}	215	1,1	54,3	33,4	17,7	360
Laubgemisch ^{a)}	95	0,87	28	13,4	6	309
Naturbelassenes Holz	<0,5 – 5 ^{b)}	0,4 – 0,8 ^{c)}	<0,5 – 5 ^{b)}	<0,5 – 5 ^{b)}		2 – 34 ^{c)}

Quellen: a) [Tab93] und [Pol91] in [Rös96]; b) [Mar99]; c) [Boc95]

Tabelle 3-10: Schadstoffkonzentration von Straßenlaub im Vergleich zu Laub aus unbelastetem Gebieten und naturbelassenem Holz

Über die Belastung von Hölzern aus Straßennähe liegen keine direkten Untersuchungen vor. Es können jedoch auf Grund der oben genannten Sachverhalte für Laub auch für Holz qualitative Ergebnisse abgeleitet werden.

Da sich die emittierten Schwermetalle an festen Oberflächen anlagern und Holz im Vergleich zu Laub eine kleine spezifische Oberfläche besitzt, ist auch von einer geringeren Schadstoffbelastung auszugehen.

Ein experimentelles Ergebnis, welche die These der geringen Zusatzbelastung von Landschaftspflegehölzern durch den Straßenverkehr stützt, findet sich in der Studie „Schwörer-Haus - Mitverbrennung externer Biomasse in einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage“ des Ministeriums für Ländlichen Raum Baden-Württemberg [MLR99]. Hier wurde unter anderem die Qualität verschiedener Holzsortimente bei der Mitverbrennung in einem bestehenden Holzheizkraftwerk untersucht. Bei der Bestimmung der Schwermetallgehalte der Aschen wurden auch nach der Verbrennung von Landschaftspflegeholz aus Straßennähe keine signifikanten Erhöhungen festgestellt.

Dennoch sollte darauf geachtet werden, dass möglichst wenig Blätter, Gras usw. in die Feuerung eingebracht werden.

3.2 Herstellung, Transport und Lagerung von Holzhackschnitzeln

Die prinzipiell möglichen Bereitstellungsketten für Holzhackschnitzel sind in Abbildung 3-6 dargestellt. Die Elemente üblicher Bereitstellungsketten werden im folgenden näher beschrieben.

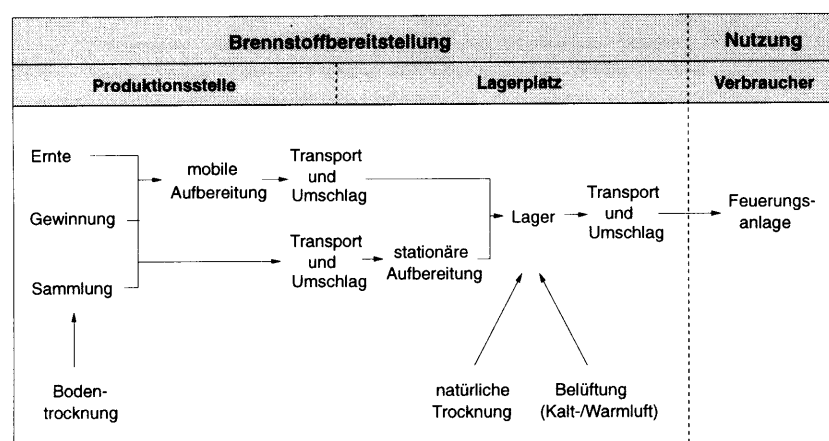


Abbildung 3-6: Typischer Aufbau und Abgrenzung der Bereitstellungsketten [Kal97]

3.2.1 Herstellung und Transport

Die Aufbereitung von Waldholz mit Hackern kann in verschiedenen Schritten erfolgen. In Tabelle 3-11 sind die möglichen Verfahren erläutert.

Art des Hackereinsatzes	Beschreibung	verwendete Hacker	Beurteilung
Mobil	Gefällte Bäume und Baumteile werden an den Rand einer Arbeitsschneise gezogen. Ein mobiler Hacker bewegt sich längs der Arbeitsschneise, wo ihm das Material zugeführt wird.	Kleinhacker, die von einem Traktor o.ä. gezogen bzw. getragen und über dessen Kurbelwelle angetrieben werden.	findet Anwendung bei Waldbauern; hoher und schwerer Arbeitsaufwand
semi-mobil	Rohmaterial wird an Wegrand gerückt und dort zwischengelagert bis zum Eintreffen des Hackers und der LKW-Container.	Kleine oder mittelgroße, mobile Hacker; angetrieben über Kurbelwelle oder Verbrennungsmotor	bei Lagerung über Wochen oder Monate findet erwünschte Trocknung statt
semi-stationär	Rohmaterial wird an zentrale Sammelstelle transportiert und dort zwischengelagert; nach Bedarf wird hiermit mobiler Hacker gefüttert, welcher über Auswurfrohr LKW oder Container befüllt; dieser bringt die Ware direkt zum Heizwerk.	mobile, mittelgroße Hacker; mit Kran ausgestattet	Transport von Rohmaterial kann arbeitsaufwändig sein; dafür hohe Auslastung des Hackers und flexible Lieferung von Hackschnitzeln möglich
Stationär	Rohmaterial wird an Heizwerk geliefert und dort von stationärem Hacker weiterverarbeitet.	mittelgroße oder große, stationäre Hacker	nur für sehr große Heizwerke rentabel, da nur dann Auslastung des Hackers gewährleistet; große Lagerflächen notwendig

Tabelle 3-11: Mögliche Formen des Hackereinsatzes bei der Verwendung des Rohstoff Waldholz (nach [Mar97])

Aus Tabelle 3-11 ist ersichtlich, dass die Art des Hackereinsatzes einen Einfluss auf die Brennstoffqualität ausübt, da der Wassergehalt z. B. im Falle des semi-stationären Einsatzes meist geringer ist (bis zu 10 % weniger) als beim stationären Einsatz. Für die aufgeführten Anwendungen werden Trommel- und Scheibenhacker eingesetzt. Diese produzieren Hackschnitzel mit Kantenlängen zwischen 5 und 50 mm. In seltenen Fällen kommen Schneckenhacker zum Einsatz. Die möglichen Hackschnitzelkantenlängen liegen bei dieser Technik zwischen 60 und 80 mm (= Grobhackschnitzel).

Wird Landschaftspflegeholz verwendet, so stehen die selben Verfahren zur Aufbereitung zur Verfügung wie in Tabelle 3-11 aufgeführt. Der Hackvorgang benötigt zwischen 1 und 3 % der in den erzeugten Hackschnitzeln enthaltenen Energie.

Neben dem Hackvorgang kann auch noch das Absieben von Fein- bzw. Grobanteilen und das Entfernen von Fremdstoffen erforderlich sein, um wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, einen sicheren Betrieb der Verbrennungsanlage zu gewährleisten.

3.2.2 Lagertechniken und Einfluss der Lagerung auf die Holzqualität

Durch die Lagerung von Holz kann dessen Wassergehalt deutlich gesenkt werden. Allerdings gibt es hier Unterschiede zwischen Stückholz und Hackschnitzeln hinsichtlich Trocknungsdauer und Anfälligkeit gegenüber Zersetzungsprozessen.

Für die Lagerung von Rohholz im Wald über die Sommermonate wird in [Mar99] eine Reduktion des Wassergehalts um 10 - 15 Prozentpunkte angegeben. Nach [Obe95] kann bei Lagerung von Rundholz an einer luftigen, sonnigen Stelle während der Sommermonate eine Verringerung des Wassergehalts von 50 auf 30 % erzielt werden.

Die Trocknungsdauer von Holzhackschnitzeln hängt unter anderem von deren Größe und Struktur ab. Je größer sie sind, desto besser kann Luft in den Hohlräumen einer Schüttung zirkulieren und somit die Trocknung beschleunigen.

Zur Trocknung werden Hackschnitzel meist zu größeren Haufen aufgeschüttet. Im Innern dieser Haufen ist die mikrobielle Abbautätigkeit schon nach einigen Tagen so stark, dass die Temperatur auf 60 - 80 °C ansteigt und bereits nach wenigen Wochen eine Wassergehaltsreduktion um bis zu 20 Prozentpunkte erreicht werden kann. Gleichzeitig wird jedoch durch die mikrobielle Aktivität Substanz abgebaut und somit der Heizwert verringert. Netto ergibt sich dennoch durch den Trocknungsprozess eine Erhöhung des unteren Heizwertes. Eine weitere Beschleunigung des Trocknungsprozesses kann durch den Einsatz von Lüftungsanlagen erreicht werden (=technische Trocknung).

In Tabelle 3-12 sind die bekannten Verfahren zur Trocknung von Holzhackschnitzeln zusammengestellt. Ausgehend von einer Studie des Bayerisches Landesamt für Wald- und Forstwirtschaft [LWF99] sind die Beurteilungskriterien finanzieller Aufwand, technischer Aufwand, Trocknungsaufwand, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung, Anlagengröße und eine zusammenfassende Bewertung in die Tabelle integriert.

Prinzipiell ist jedoch eine Zwischenlagerung zur Trocknung der Holzhackschnitzel bei den heutigen Feuerungsanlagen nicht zwingend notwendig.

	Art der Trocknung	Beschreibung des Vorgangs	finanzieller Aufwand	technischer Aufwand	Trocknungsdauer	Trockensubstanzabbau	Sporenbildung	Anlagengröße	Bewertung
Natürliche Trocknung	Sonnenenergie	Auf einer befestigten Fläche wird eine bis zu 5 cm mächtige Hackschnitzelschicht ausgebracht. Innerhalb eines Tages kann Trocknung erfolgen	*	*	*	**	**	*	Trotz einfacher Handhabung und geringer baulicher Kosten ist dieses Verfahren aufgrund des hohen manuellen Arbeitsaufwandes und der benötigten Fläche auf kleine Mengen beschränkt.
	Windenergie	Lagerung der Hackschnitzel in überdachtem, luftdurchlässigem Behälter. Trocknung durch Wind und Sonne	*	*	***	*	***	*	Einfache Handhabung; meist nur zwei Umläufe pro Jahr möglich
	biol. Selbst-erwärmung	Lagerung von mind. 12 srm Hackschnitzeln im Freien, überdacht oder in belüfteten Silos; ein mikrobiell verursachter Temperaturanstieg beschleunigt Trocknung	**	**	**	***	***	**	Bewertung der Einzelkriterien bezieht sich auf Silolagerung; einfache Handhabung; bis zu 5 Umläufe pro Jahr
Technische Trocknung	Kaltlufttrocknung	Holzackschnitzel werden unter Dach gelagert und mittels eines Gebläses mit Kaltluft belüftet	**	**	**	**	**	**	nur im Sommer möglich, da im Winter Außenluft zu kalt und zu feucht; großer finanzieller und technischer Aufwand in anbetracht des geringen Nutzens.
	Belüftungskühlung	entspricht der Kaltlufttrocknung mit Lüftungspausen	**	**	**	**	**	**	Nutzt mikrobiell erzeugte Wärme und kann daher auch im Winter betrieben werden.
	Warmlufttrocknung	stationäre oder mobile Anlage; Holzackschnitzel werden mit 40 - 130 °C warmer Luft durchblasen	***	***	*	*	*	***	Sehr schnell (wenige Stunden); wegen sehr großen technischen und finanziellen Aufwands nur für Großanlagen geeignet
	Heißlufttrocknung	entspricht Warmlufttrocknung; Temperatur liegt jedoch bei 600 - 1000 °C	***	***	*	*	*	***	Sehr schnell (10 - 120 min. für 10 srm); wegen großen technischen und finanziellen Aufwands nur für Großanlagen geeignet
	Sonnenenergie	In überdachten Hackschnitzelhaufen wird durch Solarkollektoren erwärmte Luft eingeblasen	**	***	**	**	**	**	Teuer; im Winter nicht möglich; Nutzung der Sonnenenergie durch Glasdach effektiver; hier: bis zu 4 Umläufe pro Jahr

Bedeutung der Sterne: *: klein; **: mittel; ***: groß

Tabelle 3-12: Zusammenstellung und Beurteilung der bekannten Trocknungsverfahren für Holzackschnitzel nach [LWF99].

Die in Tabelle 3-12 aufgeführte technische Trocknung mit Hilfe von Heiß- oder Warmluft wird in Flachrostanlagen mit vertikaler Luftzirkulation durchgeführt [Kal97].

Neben der Größenverteilung der Holzhackschnitzel und den Trocknungstechniken hat auch die Außentemperatur und die Luftfeuchtigkeit einen entscheidenden Einfluss auf den Trocknungsverlauf. So ist die Trocknungsdauer im Frühjahr etwa 1,5, im Herbst etwa 3,3 und im Winter etwa 2,5 mal so lange wie im Sommer.

Für verschiedene Trocknungstechniken, welche auf der biologischen Selbsterwärmung basieren, existieren Untersuchungen zur Trocknungsdauer. In Tabelle 3-13 ist eine Auswahl zusammengestellt. Die angegebenen Werte können jedoch nur als Anhalt dienen, da der Trocknungsverlauf insbesondere bei langer Lagerung nicht bekannt ist. Es ist auch zu beachten, dass eine passive Lagerung alleine zum Zweck der Trocknung nur selten durchgeführt wird. Die Trocknung wird oft nur als willkommener Nebeneffekt bei der Lagerung aus Gründen der Bevorratung angesehen.

Autor	Beschreibung	Ergebnis	Trocknungsrate
[LWF99]	Grobhackschnitzel mit 41 % Wassergehalt wurden in gut durchlüfteter Halle Ende März eingelagert.	nach 50 Tagen: 24 % Wassergehalt; nach weiteren 90 Tagen: 20,5 % Wassergehalt	während der ersten 50 Tage: 0,9 %/Tag
[Mue93]	im Freien gelagerte HHS	nach einem Monat: Wassergehalt von 40 auf 30 % gesunken; nach 3 Monaten: 25 % Wassergehalt	0,5 %/Tag
[Pra94]	Hackschnitzellagerung in siloartigem Lageraum	nach 6 Monaten: Wassergehalt von 53 auf 37 %	0,2 %/Tag
[Sto98]	Lagerung von Rinde unter Dach	nach 6 Monaten: Wassergehalt von 59 auf 30 %	0,4 % /Tag

Tabelle 3-13: Zusammenstellung der Ergebnisse verschiedener Trocknungsversuche, welche auf der biologischen Selbsterwärmung basieren

4 Feuerungstechnische Grundlagen

4.1 Verbrennungsvorgang

Zur optimalen Konzeption von Holzfeuerungsanlagen sind Kenntnisse über die bei der Verbrennung ablaufenden chemischen und physikalischen Reaktionen erforderlich. Der Verbrennungsprozess setzt sich aus den Teilprozessen Trocknung, Aufheizen, Entgasung bzw. Pyrolyse (bei der brennbare organische Gase und Holzkohle erzeugt werden), Oxidation der gasförmigen Pyrolyseprodukte, Vergasung bzw. Koksabbrand und der Aschebildung zusammen.

- Trocknungsphase:

Unter Hitzeeinwirkung wird das den Holzteilen anhaftende sowie das in den Zellen des Holzes gespeicherte Wasser verdampft. Auch lufttrockenes Holz besitzt noch einen Restwassergehalt von 15 bis 20 %. Bei einer Holztemperatur von ca. 150°C ist dieser Vorgang abgeschlossen.

- Entgasungsphase (Pyrolyse)

Bei weiterer Erwärmung des Holzes bis ca. 600°C entweichen die sogenannten "flüchtigen Bestandteile" oder "Schwelgase". Diese sind brennbar und bestehen im Wesentlichen aus Kohlenmonoxid, zahlreichen organischen Verbindungen und Wasserstoff. Nach Abschluss der Entgasungsphase hat lufttrockenes Holz bereits rund 85 % seiner Masse verloren. Vom ursprünglichen Holz bleibt nur noch die Holzkohle zurück.

- Verbrennung

Die freigesetzten Gase, deren Energiemenge ca. 70 % des im Holz gespeicherten Heizwertes entspricht, werden unter Zufuhr von Sekundärluft bei Temperaturen bis ca. 1200°C möglichst vollständig verbrannt. Flüchtige und leichtflüchtige Verbindungen verdampfen bereits bei Temperaturen unter 800°C, wobei die Gegenwart von bestimmten Heteroatomen wie z. B. Chlor ihre Flüchtigkeit noch weiter erhöht, oder sie werden durch die Oxidation und Zerstörung der organischen Brennstoffmatrix freigesetzt. Diese Mechanismen produzieren vorwiegend Dämpfe bzw. sehr kleine Partikel ($< 0,1 \mu\text{m}$).

Die Freisetzung der anorganischen Verbindungen aus der organischen Brennstoffmatrix und die anschließende Bildung der Aschepartikel erfolgt durch eine Reihe komplexer Verdampfungs-, Kondensations-, Fragmentierungs- und Agglomerationsprozesse, die zusammen mit Thermophorese (Wanderung auf Grund eines Temperaturgradienten), Partikelimpaktion (Aufprall auf eine feste Oberfläche), chemischen Reaktionen und Phasenumwandlungen auch für die Bildung von Ascheablagerungen und Verkrustungen verantwortlich sind.

Die Freisetzung der meisten anorganischen Brennstoffbestandteile, insbesondere der Alkalimetalle, erfolgt dabei während des Holzkohle-Abbrandes. Während der Trocknung, dem Aufheizen, der Pyrolyse und der Aschebildung wird dagegen nur eine geringe Menge an anorganischen Verbindungen freigesetzt.

Demgegenüber werden die in Form von diskreten Mineralien vorliegenden anorganischen Brennstoffbestandteile vorwiegend durch thermische Zerstörung der Brennstoffmatrix sowie durch Fragmentierung, Phasenumwandlung und chemische Reaktion mit anderen anorganischen Verbindungen freigesetzt. Die dabei freigesetzten Partikeln sind üblicherweise größer als 10 µm.

Bei der Verbrennung der Holzkohle werden noch einmal rund 30 % des im Holz gespeicherten Heizwertes freigesetzt. Am Ende der Verbrennung verbleibt die Holzasche mit einem Restanteil von lediglich ca. 1 % der ursprünglichen Holzmasse.

Der Schlüssel zur umweltschonenden Holzfeuerung heißt "gestufte Verbrennung". Vereinfacht dargestellt bedeutet dies, dass die verschiedenen Phasen des Zersetzungs Vorganges, nämlich Trocknung, Entgasung und Verbrennung möglichst vollständig und nacheinander ablaufen, bevor das heiße Rauchgas durch die Wärmeabgabe an das Heizwasser wieder abkühlt. Gestützt wird die gestufte Verbrennung durch eine entsprechende Geometrie des Feuerraumes und durch eine getrennte Zuführung von Primärluft und Sekundärluft, um die Strömungsvorgänge und die Verbrennungsphasen beeinflussen zu können.

- Qualität der Holzverbrennung

Die Qualität der Verbrennung von Holz wird durch folgende Parameter beeinflusst:

- **Verbrennungstemperatur:**
Temperaturen im unteren Brennkammerbereich von < 1000°C führen zu unvollständiger Verbrennung. Bei Temperaturen > 1000°C besteht die Gefahr der Schlackenbildung durch Versinterung der Asche.
- **Getrennte Zuführung des für die Verbrennung erforderlichen Sauerstoffs als Primär- und Sekundärluft.**
- **Exakte Dosierung der Sekundärluft:**
Zu wenig Sekundärluft (Sauerstoffmangel) führt zu unvollständiger Verbrennung der Holzgase. Zu viel Sekundärluft senkt die Verbrennungstemperatur und bewirkt damit eine Erhöhung der Schadstoff-Emissionen. In der Praxis wird die Sekundärluft daher häufig geregelt zugeführt (Lambda-Regelung; Messung des Restsauerstoffgehalts). Je nach Anlagespezifikation wird dabei ein Luftüberschuss (λ) zwischen 1,6 und 2,0 angestrebt.

- Qualität der Durchmischung von Brenngas und Sekundärluft:
Je intensiver die Durchmischung, desto vollständiger die Verbrennung.
- Ausreichende Verweildauer der brennenden Holzgase in der heißen Zone
(> 2 sec)

4.2 Feuerungsleistung

Die Feuerungswärmeleistung (FWL) einer Holzfeuerung ist der auf den unteren Heizwert bezogene Wärmeinhalt des Brennstoffs, der einer Feuerungsanlage im Dauerbetrieb je Zeiteinheit zugeführt werden kann. Als Heizwert (Symbol HU) wird der Quotient aus der bei vollständiger Verbrennung einer bestimmten Brennstoffmenge freiwerdenden Wärmemenge und der Masse dieser Brennstoffmenge bezeichnet, wenn das bei der Verbrennung gebildete Wasser dampfförmig vorliegt und wenn die Temperatur des Brennstoffes vor der Verbrennung und die Temperatur der entstandenen Produkte nach der Verbrennung den jeweils festgelegten gleichen Wert hat [BIZ00].

Als Nennwärmeleistung wird die höchste von der Feuerungsanlage im Dauerbetrieb abgegebene nutzbare Wärmemenge je Zeiteinheit bezeichnet.

4.3 Einfluss des Brennstoff-Feuchtegehaltes

Für den Betrieb einer Holzfeuerungsanlage ist die Kenntnis des Brennstoff-Feuchtegehaltes von entscheidender Bedeutung. Da für die Verdampfung des im Brennstoff gespeicherten Wassers Energie benötigt wird, verringert sich mit zunehmender Brennstofffeuchte sein Heizwert und damit auch die Feuerungswärmeleistung der Feuerungsanlage. Die Feuerungswärmeleistung (FWL) kann daher immer nur für einen bestimmten Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffs korrekt angegeben werden.

5 Anlagentechnik

5.1 Feuerungsarten

Holz nimmt als gasreiches Multistoffgemisch gegenüber Kohle, Öl und Gas mit weitgehend gleichbleibenden Zusammensetzungen feuerungstechnisch eine Sonderstellung ein. Wegen der während des Verbrennungsvorganges ablaufenden komplexen chemisch-physikalischen Vorgänge (siehe Abschnitt 4.1 "Verbrennungsvorgang") stellt die schadstoffarme Verbrennung von Holz hohe Anforderungen an die eingesetzte Anlagentechnik.

Für die thermische Nutzung von Holz werden heute auf dem Markt unterschiedliche Feuerungssysteme angeboten, die jeweils in besonderer Weise auf die speziellen Eigenschaften der einzusetzenden Holzbrennstoffe (z. B. Stückigkeit, Feuchte, Aschegehalt, Rindenanteil usw.) abgestimmt sind. Ihr Hauptunterscheidungsmerkmal ist dabei die Feuerungsart.

5.1.1 Rostfeuerung

Rostfeuerungen sind bei richtiger Anlagenauslegung für ein breites Brennstoffspektrum geeignet. Sie sind unempfindlich gegenüber großstückigen und feuchten Brennmaterialien. Probleme können allerdings bei sehr feinen und trockenen Brennstoffen (Schlierenbildung, Schäden am Rost, Durchtritt von unverbranntem Brennmaterial in den Ascheraum) auftreten. Außerdem liegen die Systemkosten von Rostfeuerungen vergleichsweise hoch. Moderne Roste sind zur Vermeidung von Temperaturspitzen (Verschlackung) oft wassergekühlt.

5.1.1.1 Vorschubrostfeuerung

Abbildung 5-1 zeigt die Schnittdarstellung einer Vorschubrostfeuerung.

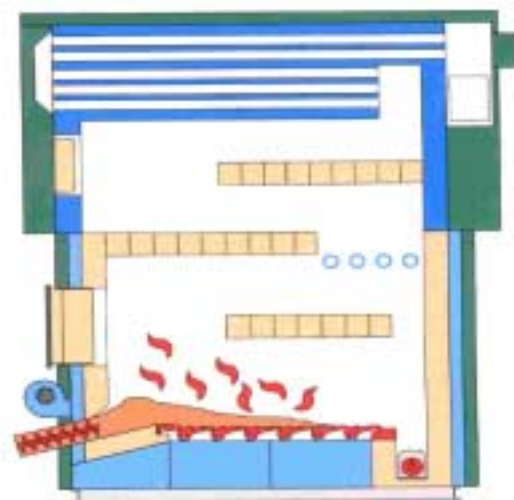


Abbildung 5-1: Schnittdarstellung einer Vorschubrostfeuerung; [Fa.Tiba-Müller]

Aufbau, Funktion :

Eine Einschubschnecke schiebt das Brennmaterial auf den horizontalen Rost. Von dort wird der Brennstoff über bewegte Rostelemente in den Brennraum weiterbefördert und durchmischt. Dies bewirkt, dass die Trocknung und Entgasung des Brennstoffes nacheinander und räumlich getrennt erfolgen kann. Die relativ große Ausbreitung des Brennstoffbettes auf den Rostelementen und die damit verbundene intensivere Trocknung und Entgasung ermöglicht auch den Einsatz von feuchterem Brennmaterial.

Die Primärluft wird von unten her durch die Rostglieder zugeführt. Einige Hersteller unterteilen den Raum unterhalb des Rostes mittels Querwänden in Sektionen. Auf diese Weise können der Trocknungs-, Entgasungs- und Holzkohleausbrandzone die jeweils optimalen Primärluftmengen zugeführt werden.

Durch die Bewegung der Rostelemente wird die Asche in den Aschekanal am Ende des Rostes befördert und kann so mittels Ascheschnecke automatisch aus dem Brennraum entfernt werden. Ein Teil der Asche fällt jedoch durch den Rost nach unten und muss von dort in größeren Zeitabständen manuell entsorgt werden. Bei Anlagen mit Feuerungswärmeleistungen ab 1 MW werden automatische Entaschungssysteme eingesetzt.

Der Bereich der stetigen Leistungsregelung liegt zwischen 30 % und 100 % der Nennwärmeleistung, bezogen auf einen Wassergehalt von 55 % im Brennstoff ($w = 55\%$).

Anforderungen an den Brennstoff -siehe hierzu auch Abschnitt 3 "Einsatzmaterial":

Wassergehalt:

Bei Nennlast: $w = 30 \dots 55 \%$

Schwachlastbetrieb < 50 % der Nennwärmeleistung : max. $w = 50 \%$

Aschegehalt:

Bei Holzbrennstoffen mit höherem Aschegehalt ($> 3 \%$), vor allem in Kombination mit niedrigem Wassergehalt ($< 20 \%$), besteht wegen der hier erreichbaren höheren Verbrennungstemperatur die Gefahr der Ascheverschlackung.

Körnung:

max. G 50 (gemäß ÖNORM M 7133); siehe Tabelle 3-2 in Abschnitt 3.1

Problembereiche beim Betrieb derartiger Anlagen:

- Sommerbetrieb

Aufgrund der begrenzten Teillastfähigkeit ist der Sommerbetrieb in einem üblichen Wärmenetz problematisch.

- Optimale Rostbedeckung

Durch sorgfältige Abstimmung von Primärluft, Rostbewegung und Brennstoffmenge sollte der Rost auch bei wechselnden Lastzuständen und Brennstoffsortimenten immer weitgehend mit Brennstoff bedeckt sein. Die hierzu erforderlichen Systemeinstellungen sind jedoch sehr zeitaufwändig und werden in der Praxis nicht immer mit der nötigen Sorgfalt durchgeführt. Aus diesem Grunde ist zu beobachten, dass oft nur der vordere Rostteil mit Brennstoff bedeckt ist. Dies hat zur Folge, dass die Primärluft bevorzugt im hinteren, unbedeckten Rostabschnitt austritt und damit für den Verbrennungsprozess im vorderen Rostteil nicht mehr zur Verfügung steht. Um dennoch auch diesen Bereich ausreichend mit Primärluft versorgen zu können, muss der Primärluftvolumenstrom erhöht werden. Dadurch erhöht sich jedoch die Gefahr der Asche- und Glutpartikel-Aufwirbelung im unbedeckten Rostteil. Außerdem erschwert der erhöhte Primärluftvolumenstrom die Lambda-Regelung.

- Falschluf durch undichte Brennstoffzufuhr

Bei manchen Anlagen wird die Einschubschnecke nach jedem Arbeitstakt leergefahren oder bleibt unvollständig gefüllt. Dabei wird wegen des Unterdruckes im Feuerraum Falschluf in den Brennraum gesaugt, was die Lambda-Regelung behindert.

- Einstellung der Feuerungsparameter

Bei Rostfeuerungen muss eine Vielzahl von Parametern eingestellt werden, die teilweise voneinander abhängig sind. Nach jeder Parameteränderung sollte daher vor der jeweiligen Erfolgskontrolle das Erreichen des stationären Zustandes abgewartet werden. Die optimale Einstellung der Anlage wird damit sehr zeitaufwändig.

5.1.1.2 Treppenrostfeuerung

Abbildung 5-2 zeigt die Schnittdarstellung einer Treppenrostfeuerung.

Abbildung 5-2: Schnittdarstellung einer Treppenrostfeuerung
[Fa. Tiba-Müller]

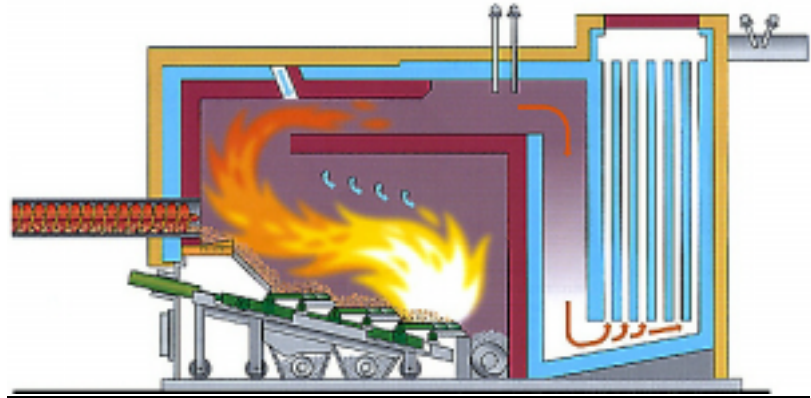
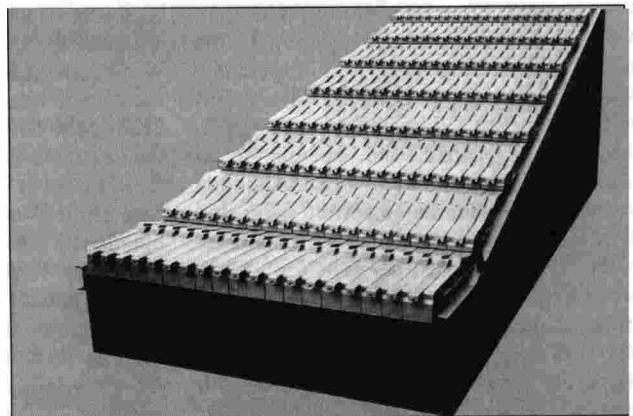


Abbildung 5-3: Ansicht eines Treppenrostes [SWL00]



Aufbau, Funktion :

Die Funktionsweise ist ähnlich wie bei der Vorschubrostfeuerung, jedoch wird der Brennstoff durch den abfallenden Rost intensiver umgewälzt und somit intensiver getrocknet und entgast. Bei Treppenrostfeuerungen wird das Brennmaterial teilweise auch alternativ zur Einschubschnecke mit einem hydraulischen Stempel auf den Rost geschoben. Der Rost beginnt oft bereits unmittelbar am Eingang mit den Treppenelementen. Bei verschiedenen Ausführungen ist hier jedoch zur besseren Auflösung von Materialklumpen bzw. zur Verbesserung der Vortrocknung ein steil abfallendes Festrostelement vorgeschaltet. Im Treppenrostbereich werden die Funktionsschritte Trocknung, Entgasung sowie Holzkohleausbrand durchlaufen.

Die durch den Rost fallende Asche wird entweder über Trichter in einen luftdicht abgeschlossenen Aschecontainer unterhalb der Feuerung geleitet oder über Fördereinrichtungen aus dem Brennraum entfernt.

Anforderungen an den Brennstoff - siehe hierzu auch Abschnitt 3 "Einsatzmaterial":

Wassergehalt:

Bei Nennlast:

$w = 30 \dots 60 \%$

Schwachlastbetrieb $< 50 \%$ der Nennwärmeleistung: $\max. w = 50 \%$

Aschegehalt:

Der Aschegehalt sollte 8% nicht übersteigen.

Körnung:

Brennstoffzufuhr über Einschubschnecke, Schneckendurchmesser $< 250 \text{ mm}$

$\max. G 50$ (gemäß ÖNORM M 7133)

Brennstoffzufuhr hydraulisch über Stempel

$\max. G 100$ (gemäß ÖNORM M 7133)

Die hydraulische Einschubvorrichtung ist üblicherweise mit einer Abschereinheit für überstehende Stücke ausgerüstet. Diese Einschubart wird meist kombiniert mit ebenfalls für grobe Brennstoffe geeignete Fördereinrichtungen zwischen Silo und Feuerungsanlage wie z. B. Kratzkette, Trogkette, Schubboden.

Problembereiche beim Betrieb derartiger Anlagen:

Siehe Abschnitt 5.1.1.1 „Vorschubrostfeuerung“

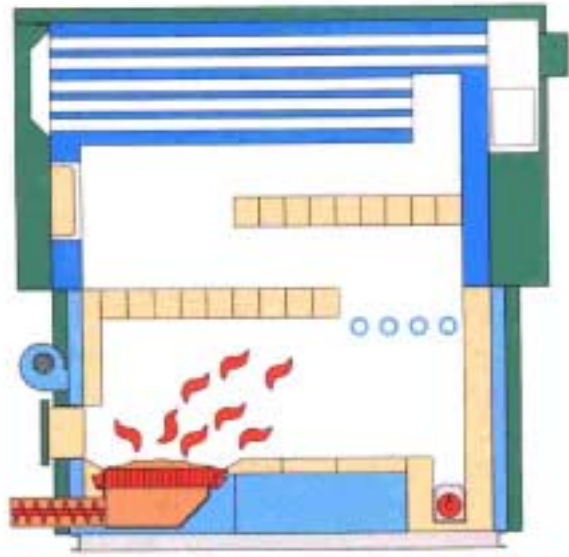
5.1.2 Unterschubfeuerung

Unterschubfeuerungen werden seit ca. 15 Jahren verstärkt eingesetzt. Sie sind für groben und nicht zu feuchten Brennstoff geeignet. Der anfängliche Nachteil im Bereich der Ascheentsorgung, die mangels geeigneter mechanischer Lösungen meist manuell erfolgen musste, ist inzwischen durch Kombination von Unterschub- und Minirostfeuerung weitgehend beseitigt. Positiv sind auch die vergleichsweise niedrigen Investitionskosten sowie die im Vergleich zu Rostfeuerungen bessere Regelbarkeit zu werten.

Unterschubfeuerungen sind bei Feuerungswärmeleistungen $< 5 \text{ MW}$ weit verbreitet.

Abbildung 5-4 zeigt die Schnittdarstellung einer Unterschubfeuerung.

Abbildung 5-4: Schnittdarstellung einer Unterschubfeuerung [Fa. Tiba-Müller]



Aufbau, Funktion :

Mittels Förderschnecke wird das Brennmaterial von unten in die Brennmulde gedrückt, die ständig gefüllt gehalten wird. Die Primärluft wird durch die Seitenwände der Brennmulde in das Brennstoffbett geführt. Innerhalb der Brennstoffmulde „durchläuft“ das Brennmaterial von unten her die Funktionsschritte Trocknung, Entgasung und Holzkohleausbrand. Der Wärmefluss in der Brennmulde verläuft in umgekehrter Richtung vom Glutbett aus nach unten.

Die über dem Glutbett aufsteigenden Holzgase werden durch seitlich in den Brennkammerwänden angebrachte Düsen mit Sekundärluft vermischt und brennen dann unter möglichst hohen Temperaturen in der Nachbrennkammer aus. Die Verweilzeit der brennenden Gase im ungekühlten Bereich der Nachbrennkammer sollte dabei mindestens 1 Sekunde betragen.

Ein Teil der auf dem Brennstoffhaufen zurückbleibende Asche wird von den aufsteigenden Holzgasen mitgerissen und in den Bereichen niedriger Strömungsgeschwindigkeit abgelagert. Der andere Teil der Asche wird vom nachgeschobenen Brennstoff aus der Brennmulde gedrückt und muss von dort in regelmäßigen Abständen entfernt werden.

Der Bereich der stetigen Leistungsregelung liegt zwischen 20 und 100 % der Nennwärmeleistung ($w = 45\%$).

Von einigen Herstellern werden bei Einsatz von trockenen Brennstoffen und Anlagenleistungen bis ca. 400 kW automatische Zündanlagen angeboten. Damit kann die Glut bei Schwachlastbetrieb zeitweise völlig erlöschen. Die Feuerung wird erst bei Leistungsanforderung mittels Heißluftgebläse wieder gezündet. Der emissionsträchtige Gluterhaltungsbetrieb wird somit vermieden.

Anforderungen an den Brennstoff -siehe hierzu auch Abschnitt 3 "Einsatzmaterial":

Wassergehalt:

Im gesamten Leistungsbereich: $w = 10$ bis 50%

Schwachlastbetrieb $< 30\%$ der Nennwärmeleistung: max. $w = 45\%$

Aschegehalt:

Der Aschegehalt des Brennstoffs sollte 3% nicht überschreiten.

Staubgehalt:

Der Feinanteil im Brennstoff sollte 50% nicht überschreiten.

Körnung:

max. G 50 (ÖNORM M 7133)

Problembereiche beim Betrieb derartiger Anlagen:

- Brennstoff-Überhäufung:

Bei sehr feuchten Brennstoffen und beim kalten Anfahren der Feuerung wird der eingestellte Sollwert der Flammentemperatur nicht erreicht. Dies kann zu einer Überfüllung des Brennraumes führen. Als Gegenmaßnahme werden sogenannte Glutstocküberwachungseinrichtungen angeboten, die beim Erreichen der maximal zulässigen Brennstoffhöhe den weiteren Einschub von Brennmaterial stoppen.

- Rostentaschung:

Ein Teil der Asche wird von den durch das Glutbett aufsteigenden Holzgasen mitgerissen und in Bereichen geringerer Strömungsgeschwindigkeit wieder abgelagert. Diese Sedimentation findet hauptsächlich zwischen der Brennmulde und der Entaschungsschnecke statt. Vor allem im Teillastbetrieb mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit im Brennraum und bei aschereichen Brennstoffen können dabei erhebliche Ablagerungsmengen entstehen, die manuell zur Entaschungsschnecke gezogen werden müssen.

- Falschluf durch undichte Brennstoffzufuhr:

Bei manchen Anlagen wird die Einschubschnecke nach jedem Arbeitstakt leergefahren. Wegen des bestehenden Unterdruckes im Feuerraum kann zusätzliche Luft über die Einschubschnecke in die Brennstoffmulde gesaugt werden. Dies führt zu einer unbeabsichtigten Erhöhung der Primärluft und damit zu einer Störung der Verbrennung.

- Fremdkörper in der Brennmulde:

Eisenteile und Steine werden vor allem im Teillastbetrieb nicht aus der Brennmulde gedrückt, sondern lediglich an deren Wand umgewälzt. Dies führt zu einem erhöhten Verschleiß.

5.1.3 Unterschubfeuerung mit Außenrost

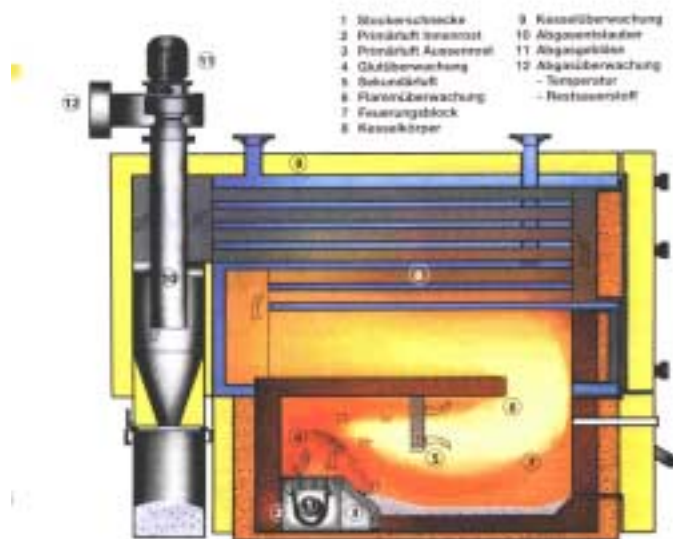


Abbildung 5-5: Schnittdarstellung einer Unterschub-Feuerung mit Außenrost
[Fa. Köb]

Aufbau, Funktion:

Grundsätzlich unterscheidet sich die Funktionsweise nicht von der Unterschubfeuerung ohne Außenrost. Allerdings wird durch den Außenrost der Brennstoff zusätzlich ausgebreitet und umgeschichtet. Auch wird bereits im Bereich des Außenrostes Primärluft zugeführt. Durch diese Maßnahmen ist es möglich, auch feuchtere Brennstoffe einzusetzen als bei der konventionellen Unterschubfeuerung.

Der Bereich der stetigen Leistungsregelung liegt zwischen 20 und 100 % der Nennwärmeleistung ($w = 45 \%$).

Anforderungen an den Brennstoff -siehe hierzu auch Abschnitt 3 "Einsatzmaterial":

Wassergehalt:

Im gesamten Leistungsbereich :

$w = 10 \dots 52 \%$

Schwachlastbetrieb $< 30 \%$ der Nennwärmeleistung: max. $w = 47 \%$

Aschegehalt:

Der Aschegehalt sollte wie bei der Unterschubfeuerung 3 % nicht überschreiten.

Körnung : max. G 50 (ÖNORM M 7133, wie Unterschubfeuerung)

Problembereiche beim Betrieb derartiger Anlagen:

Siehe Abschnitt 5.1.2 Unterschubfeuerungsanlagen

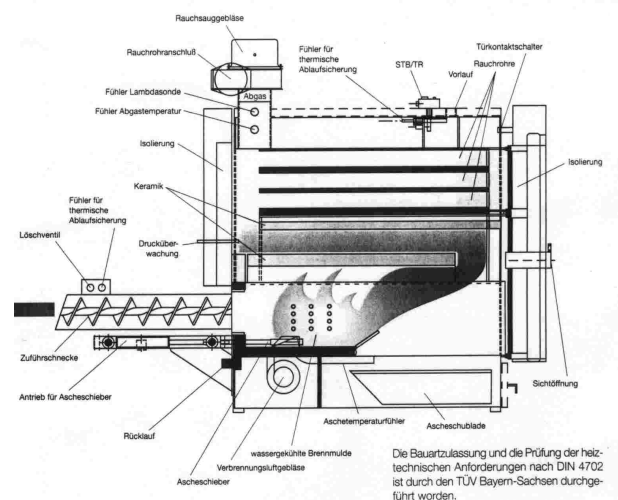
5.1.4 Mischform zwischen Unterschub- und Rostfeuerung

Abbildung 5-6: Schnittdarstellung einer Festrost-Feuerung [Fa. Ökotherm]

Aufbau, Funktion:

Mittels einer Förderschnecke wird das Brennmaterial horizontal auf einen ebenen oder abfallenden Rost geschoben. Die Primärluft wird durch den Rost bzw. von der Seite zugeführt. Dieser Feuerungstyp wird bis zu einer Feuerleistung von ca. 800 kW auf dem Markt angeboten. Bei der in Abbildung 5-6 dargestellten Ausführung ermöglicht ein mechanischer Ascheschieber auch den Einsatz aschereicher Brennstoffe.

Der Bereich der stetigen Leistungsregelung liegt zwischen 30 und 100 % der Nennwärmeleistung ($w = 35\%$).

Anforderungen an den Brennstoff -siehe hierzu auch Abschnitt 3 "Einsatzmaterial":

Wassergehalt:

Bei Nennlast

$w = 8$ bis 45%

Schwachlastbetrieb $< 50\%$ der Nennwärmeleistung: max. $w = 30\%$

Aschegehalt:

Der Aschegehalt sollte bei Anlagen ohne mechanische Entaschung 2 %, bei Anlagen mit mechanischer Entaschung 8 % nicht überschreiten.

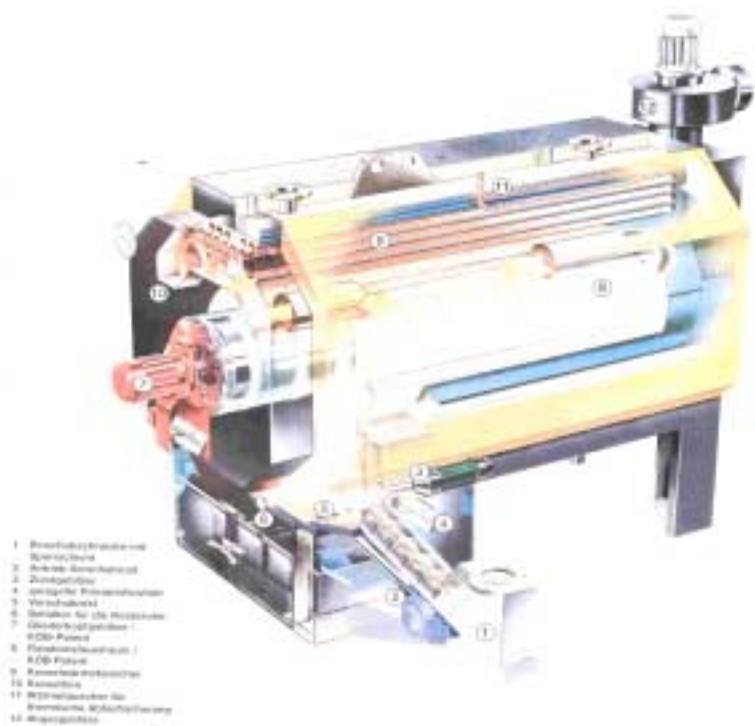
Körnung : max. G 50 (ÖNORM M 7133)

Problembereiche beim Betrieb derartiger Anlagen:

Wegen der geringen Verbreitung dieses Feuerungstyps sind Problembereiche bisher nicht bekannt.

5.1.5 Kurz-Vorschubrost mit Rotationsbrennkammer (Sonderbauform)

Abbildung 5-7: Schnittdarstellung einer KÖB-Pyrot-Feuerung [Fa. Köb]



Aufbau, Funktion:

Mittels einer Förderschnecke wird das Brennmaterial auf einen kurzen Treppenrost geschoben. Hier erfolgen die Funktionsschritte Trocknung, Entgasung und Holzkohleausbrand. Die Primärluftzufuhr erfolgt von unten durch den Rost.

Die aufsteigenden Holzgase strömen anschließend in eine liegende zylindrische Brennkammer, in der ein Gliederkopf-Gebläse („Rotationsgebläse“, siehe auch Abbildung 5-8) unter Sekundärluftzufuhr das brennende Gasgemisch in Rotation versetzt und damit eine intensive, massenstromunabhängige Turbulenz erzeugt. Die optimale Vermischung der Gase sowie deren relativ lange Verweildauer in der heißen Zone sichern einen guten Ausbrand.

Der Bereich der stetigen Leistungsregelung liegt zwischen 25 und 100 % der Nennwärmeleistung ($w = 35 \%$). Unterhalb des regelbaren Leistungsbereichs wird der Kessel abgeschaltet und bei höherer Leistungsanforderung wieder automatisch gezündet.

Anforderungen an den Brennstoff -siehe hierzu auch Abschnitt 3 "Einsatzmaterial":

Wassergehalt:

Im gesamten Leistungsbereich:

$w = 8$ bis 35%

Schwachlastbetrieb $< 30 \%$ der Nennwärmeleistung: $\max. w = 35 \%$

Körnung: $\max. G 50$ (ÖNORM M 7133)

Problembereiche beim Betrieb derartiger Anlagen:

Wegen kurzer Markteinführung sind bisher noch keine Probleme bekannt.

5.1.6 Einblasfeuerung

Einblasfeuerungen werden bei trockenen, gleichmäßig feinkörnigen Brennstoffen (Späne, Stäube $< 5 \text{ mm}$) meist in der Holzverarbeitenden Industrie, bei der das Brenngut als Abfall anfällt, eingesetzt. Bei modernen Anlagen wird der Brennstoff tangential in eine zyklonartige Brennkammer mit nachgeschaltetem Brennraum eingeblasen. Vor allem für Brennstoffe mit hohem Staubgehalt stellen derartige Anlagen eine optimale und umweltgerechte Verbrennung sicher (geringe Schadstoffemissionen). Als weitere Vorzüge sind die gute Regelbarkeit sowie der weitgehend vollautomatische Anlagenbetrieb zu nennen.

5.1.7 Vorofenfeuerung

Bei der Vorofenfeuerung wird das Holz räumlich getrennt in 2 Anlageteilen, dem Vorofen und der Kesselanlage, verbrannt. Im Vorofen erfolgt der Eintrag des Brennmaterials mit anschließender Trocknung und Holzentgasung. Bei ausreichender Reaktionszeit im Vorofen verhindert die hohe Reaktionstemperatur die Ausbildung und Abscheidung von Teer und Ruß. Die heißen Schwelgase gelangen nach Austritt aus dem Vorofen unter Beimischung von Sekundärluft in den Flammkanal des Kessels, wo die Nachverbrennung stattfindet. Je nach Kesselkonstruktion wird die Wärme im Brennraum oder im nachgeschalteten Wärmetauscher an das Heizwasser abgegeben. Nachteilig ist bei dieser Feuerung der erhöhte Platzbedarf.

5.1.8 Wirbelschichtfeuerung (zirkulierende)

Wirbelschichtfeuerungen bestehen aus einer senkrecht stehenden Brennkammer, in der der Brennstoff mit inertem Material (meist Sand) vermischt von Luft durchströmt und verwirbelt wird. Die starke Durchmischung bewirkt einen guten Ausbrand mit nur geringen Schadstoffemissionen. Wegen der vergleichsweise hohen Investitionskosten werden derartige Anlagen jedoch erst ab einer Feuerungswärmeleistung > 5 MW wirtschaftlich. Wirbelschichtfeuerungen sind unempfindlich gegenüber Heizwertschwankungen des Brennmaterials. Der Brennstoff muss jedoch ausreichend zerkleinert sein (< 50 mm). Als Nachteile sind die relativ lange Aufheizzeit mittels Öl- oder Gasbrenner sowie der erhöhte Ascheanfall zu nennen.

5.1.9 Schachtfeuerung

Schachtfeuerungen mit unterem Abbrand sind für die Verbrennung von stückigem Holz gut geeignet.

Am unteren Ende des Füllschachtes, der über eine Klappenschleuse mit Brennmaterial beschickt wird, befindet sich die Abbrandzone. Die Trocknung und Entgasung des Brennmaterials erfolgt bereits im Füllschacht. Auf Grund des im anschließenden Feuerraum herrschenden Unterdrucks werden die Holzgase durch die Abbrandzone in den Feuerraum gesaugt und mit dem durch den Rost eintretenden Verbrennungsluftsaauerstoff vermischt.

Ein Vorteil von Schachtfeuerungen liegt in der eingesparten Zerkleinerung stückiger Holzteile. Als Nachteil ist die schlechtere Regelbarkeit der Anlage bei geringer Lastabnahme zu nennen.

Eine interessante Weiterentwicklung der Schachtfeuerung mit unterem Abbrand stellt das sogenannte Jülicher Verbrennungsverfahren (Thermoreaktor) dar. Vorteilhaft bei dieser Feuerung ist der vergleichsweise unkomplizierte Anlagenaufbau und das gute Ausbrandverhalten. Erhöhte NO_x -Emissionen durch die hohe Nachverbrennungstemperatur und Schwierigkeiten bei der Stabilisierung des Vergasungsvorganges sind bei dieser Feuerungsart als ungünstig einzuschätzen [VDI].

5.1.10 Gegenüberstellung der Hauptfeuerungsarten

Anhand der VDI 3462 Bl. 4 sind in Tabelle 5-1 die wichtigsten Kennzahlen der Hauptfeuerungsarten zusammenfassend dargestellt.

Feuerungsart	Geeigneter Brennstoff	Feuerungswärmeleistung	Vorteile	Nachteile
Rostfeuerung	Unzerkleinerte Rinde, grobstückige, feuchte Brennstoffe mit hohem Aschegehalt	ab 600 kW	<ul style="list-style-type: none"> - breites Brennstoffspektrum - keine Vorzerkleinerung nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - Schlierenbildung nicht auszuschließen - Hohe Investitions- und Betriebskosten

Unterschub-, Unterschubzyklon- Feuerung	Trockene u. feuchte Späne, Hackschnitzel, max. 50 % Staubanteil	von 100 kW bis 5000 kW	<ul style="list-style-type: none"> - Breites Brennstoffspektrum - Einfache Technik 	<ul style="list-style-type: none"> - Probleme durch Brennstoff im System bei Abschaltung - Diskontinuierliche Entaschung - Träge Regelbarkeit
Einblasfeuerung	Stäube, Späne	von 1000 kW bis 8000 kW	<ul style="list-style-type: none"> - Gute und schnelle Regelbarkeit - Ideale Verbrennung von Stäuben - Gute Emissionswerte 	<ul style="list-style-type: none"> - Empfindlich bei Brennstoffschwankungen, hinsichtlich Menge, Zusammensetzung und Feuchte - Muffel muß mit Stützbrenner auf Temperatur gebracht werden
Vorofen-, Vergaserfeuerung, Thermoreaktor	Späne, Pellets, Hackgut	von 10 kW bis 6000 kW	<ul style="list-style-type: none"> - Niedrige CO- und Ges.-C-Emissionen - Geringe Rauchgasstaubgehalte 	- Hohe NOx-Werte
Wirbelschichtfeuerung (zirkulierende)	Späne, Hackgut	ab 5000 kW	<ul style="list-style-type: none"> - Niedrige NOx-Werte - Additivzugabe möglich - Schnelle Regelbarkeit - Gute Ausbrandbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Investitions- und Betriebskosten - erhöhter Ascheanfall und Ascheentsorgungskosten

Tabelle 5-1: Zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Kennzahlen der Hauptfeuerungsarten [VDI]

5.2 Optionale Zusatzausrüstungen für Feuerungsanlagen

- Moderne Mess- und Regelungstechnik

Für die effiziente und umweltgerechte Verbrennung von Holz ist der Einsatz moderner Mess- und Regelungstechnik unabdingbare Voraussetzung (siehe hierzu Abschnitt 5.4 "Regelungstechnik").

- Abgasrezirkulation:

Bei Brennstoff mit höherem Aschenanteil (> 3 %) besteht die Gefahr der Schlackenbildung durch Versinterung der Asche. Als Gegenmaßnahme wird ein Teil des Abgasstromes zur Kühlung des Verbrennungsvorganges in die Brennkammer zurückgeführt.

- Automatische Rost-Entaschung:

Bei größeren Feuerungsleistungen und vor allem bei der Verwendung von Brennstoffen mit höherem Rindenanteil empfiehlt sich wegen des erhöhten Ascheanfalls eine automatische Rostentaschung.

- Automatische Kesselabreinigung:

Die Intervalle der manuellen Kesselreinigung können erheblich verlängert werden, wenn locker anhaftende Ablagerungen in den Wärmetauscherrohren periodisch entfernt werden.

Denkbare Ausführungsformen :

- periodische Druckluftstöße in das Rohrsystem (z. B. in 15-Minuten-Intervallen)
- periodische Ultraschall-Abreinigung (z.B. in 15-Minuten-Intervallen)

5.3 Optimierung der Ausbrandbedingungen

Entscheidende Kriterien für einen guten Ausbrand bei Holzfeuerungsanlagen sind:

- Optimale Luftzufuhr bei gestufter Verbrennung:

Entscheidend für einen guten Ausbrand ist immer eine optimale Luftmengen Zufuhr. Bei gut eingestellten Holzfeuerungsanlagen ist dabei von einem erforderlichen Luftüberschuss λ zwischen 1,4 und 2,0 auszugehen. Die ständige Ermittlung des jeweils erforderlichen Sauerstoffbedarfs und die tatsächliche Versorgung der Ausbrandzone mit der richtigen Sauerstoffmenge (Sekundärluft) ist jedoch nur durch den Einsatz moderner Mess- und Regelungstechnik realisierbar. Siehe hierzu Abschnitt 5.4 "Regelungstechnik".

- Ausreichend hohe Brennraumtemperatur und Verweildauer:

Eine weitere Grundvoraussetzung für einen guten Ausbrand ist das Erreichen einer möglichst hohen Verbrennungstemperatur. Grundsätzlich gilt: Je höher die Verbrennungstemperatur, desto kürzer ist die für den vollständigen Ausbrand benötigte Zeit. Bei Holzfeuerungsanlagen sollte daher die Mindesttemperatur in der Ausbrandzone 800 bis 850°C nicht unterschreiten. Die Verweildauer der Brenngase in der heißen Zone sollte dabei mindestens 2 Sekunden betragen. Die maximal in der Oxidationszone der Brenngase erreichbaren Temperaturen liegen bei optimiertem Luftüberschuss (λ um 1,5) und lufttrockenem Brennmaterial bei ca. 1200°C.

- Gute Durchmischung von Brenngasen und Sekundärluft:

Strömende Gase neigen oft zur sogenannten Strähnenbildung. In der Oxidationszone bewegen sich dabei Brenngas und Sekundärluft parallel nebeneinander, ohne sich in ausreichendem Maße zu vermischen. Bei Rost- und Unterschubfeuerungen lässt sich die erforderliche Verwirbelung in der Brennkammer beispielsweise durch ein Gliederkopfgebläse erreichen. Dieses Gliederkopfgebläse durchmischt die brennbaren Gase und die Verbrennungsluft intensiv in der Brennkammer, wobei sich eine dreidimensionale turbulente Wirbelströmung ausbildet, die von einem umlaufenden mechanisch angetriebenen Kettenkranz erzeugt wird [LfU89].

- Möglichst kontinuierlicher Anlagenbetrieb im Bereich der Nennwärmeleistung:

Schlechte Ausbrandbedingungen sind bei An- und Abfahrzuständen der Feuerungsanlage unvermeidlich. Vor allem in der Anfahrphase sind wegen der noch kalten Brennkammer die für eine optimale Verbrennung erforderlichen Voraussetzungen noch nicht vorhanden. Holzfeuerungsanlagen sollten daher über möglichst lange Zeiträume

kontinuierlich im Bereich ihrer Nennwärmeleistung betrieben werden. Schwachlastphasen sollten nach Möglichkeit vermieden werden.

- Zugabe von Oxidationskatalysatoren:

Zur Verbesserung des Ausbrandes können auch Brennstoffadditive (Oxidationskatalysatoren) zugegeben werden. Diese bewirken eine frühere Zündung des Restkokes, einen schnelleren Abbrand und damit eine höhere Flammenstabilität.

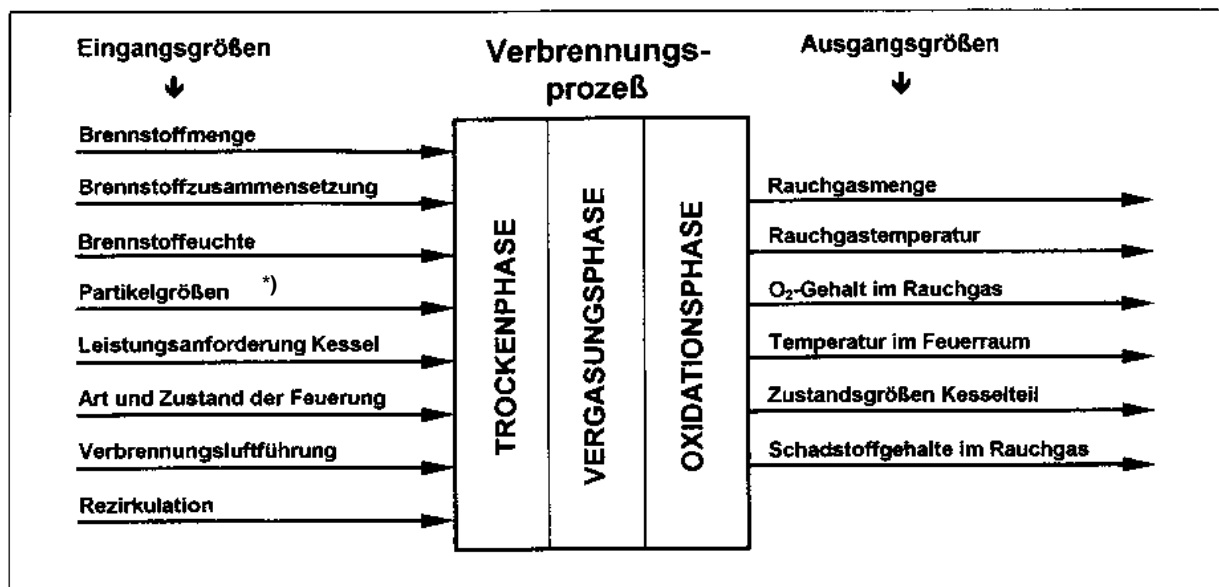
5.4 Regelungstechnik

Wegen der großen Zahl von Einflussfaktoren auf die Verbrennung wirkt sich eine Mess- und Regelungstechnik entscheidend auf die Verbrennungsqualität und das Emissionsverhalten von Holzfeuerungsanlagen aus. Abbildung 5-8 zeigt qualitativ die Einflussfaktoren und deren Zusammenwirken beim Verbrennen von Holz.

Durch den Einsatz moderner Mess- und Regelungssysteme lassen sich erhebliche Fortschritte im Hinblick auf

- die Gewährleistung eines Feuerungsbetriebes mit minimaler Emission an unverbrannten Gasen (unabhängig vom jeweiligen Betriebszustand),
 - den Betrieb der Anlage bei maximalem Wirkungsgrad in allen Betriebszuständen und
 - eine schonende Betriebsweise der Feuerung (Vermeidung von unnötigem Anlagenverschleiß und dadurch Minderung der Reparatur und Wartungskosten)
- erzielen.

Auch unter Kostengesichtspunkten ist der Einbau eines modernen Mess- und Regelungssystems vorteilhaft, da die zusätzlichen Investitionskosten auf Grund der daraus resultierenden Anlagenoptimierung an anderer Stelle wieder eingespart werden können. Um einen störungsfreien und emissionsarmen Betrieb gewährleisten zu können, werden automatische Holzfeuerungsanlagen mit verschiedenen Regelkreisen ausgerüstet. Die wichtigsten Regelkreise umfassen die Unterdruck-, Leistungs- und Verbrennungsregelung.



^{*)} Stückigkeit des Holzes und Feinanteil

Abbildung 5-8: Einflussfaktoren und deren Zusammenwirken bezüglich der Verbrennung von Holz [Mar99]

5.4.1 Unterdruckregelung

Bei dieser Regelung wird der Unterdruck im Feuerraum unabhängig vom Lastzustand und den jeweiligen Brennstoffbedingungen auf einem bestimmten Sollwert konstant gehalten. Abweichungen vom Sollwert werden durch Veränderung der Abgasventilator Drehzahl ausgeglichen. Neben der Grobeinstellung der Verbrennungsbedingungen erfüllt die Unterdruckregelung eine sicherheitstechnische Funktion. Sie verhindert den Austritt brennbarer und giftiger Schwelgase aus dem Feuerraum in den Heizungsraum. Abbildung 5-9 zeigt das Funktionsprinzip einer Unterdruckregelung.

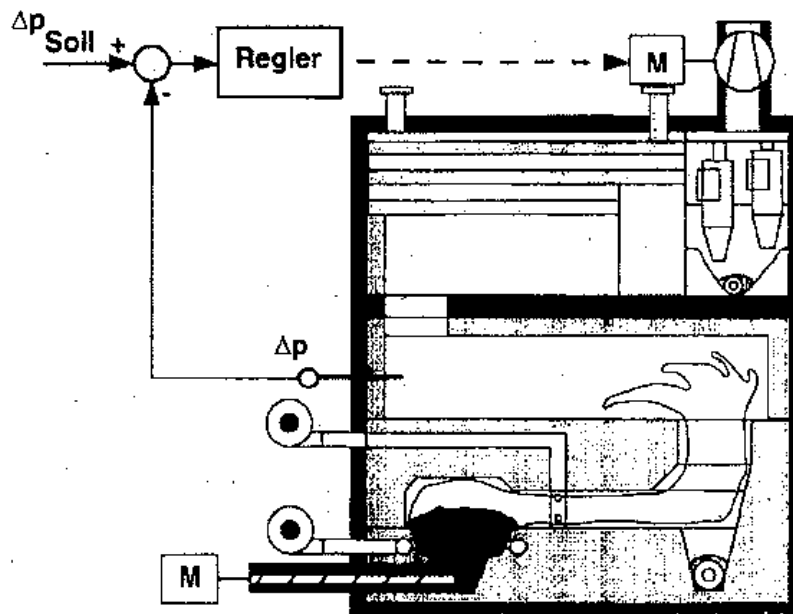


Abbildung 5-9: Funktionsprinzip der Unterdruckregelung: Messung des Feuerraumunterdrucks Δp und Regelung des Abgasventilators zur Konstanthaltung des Unterdrucks [Nus00].

5.4.2 Leistungsregelung

Automatische Feuerungen verfügen über eine Leistungsregelung, welche den optimalen Anlagenbetrieb auch bei unterschiedlichen Leistungsanforderungen sicherstellt. Die Leistung einer Holzfeuerung wird bestimmt durch die Menge der erzeugten Holzgase. Die Holzgasmenge ist wiederum abhängig von der Größe des Glutbettes und dem Primärluftvolumenstrom. Als Signal für die Leistungsregelung kann beispielsweise die Kesselwassertemperatur dienen. Bei Abweichungen vom Sollwert wird die Feuerungsleistung durch Veränderung der Brennstoffzufuhr sowie der Primär- und Sekundärluftvolumenströme an den jeweiligen Wärmebedarf angepasst. Bei den meisten heute auf dem Markt angebotenen automatischen Feuerungsanlagen ist die Leistungsregelung bis zu einer Teillast von ca. 30 % möglich. Bei noch geringerer Leistungsanforderung werden die Anlagen im Ein-/Aus-Betrieb gefahren. Teilweise wird auch bereits das automatische Abschalten bzw. Wiederanzünden der Feuerung angeboten. Durch Anwendung dieser Technik kann der emissionsreiche Gluterhaltungsbetrieb vermieden werden. In Abbildung 5-10 ist die Funktionsweise der Leistungsregelung dargestellt.

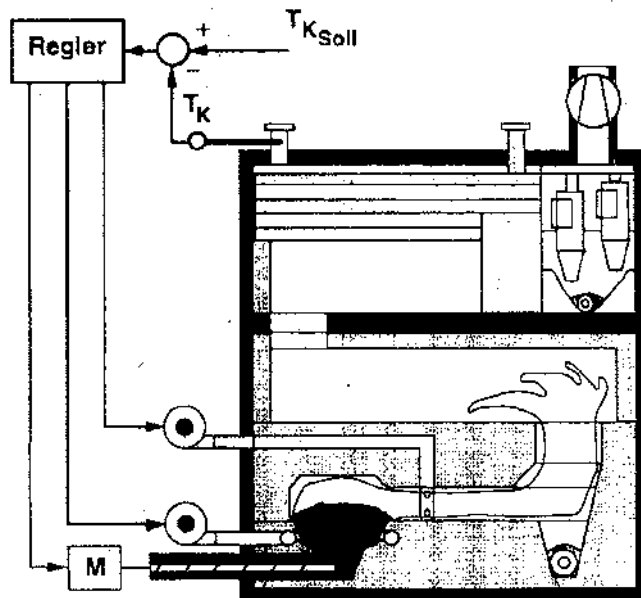


Abbildung 5-10: Funktionsprinzip der Leistungsregelung: Messung der Kesseltemperatur T_K und Regelung der Brennstoff- und Luftmengen in Abhängigkeit vom Wärmebedarf [Nus00].

5.4.3 Verbrennungsregelung

Aufgabe der Verbrennungsregelung ist die Sicherstellung einer hohen Ausbrandqualität. Ein Indikator für die Güte des Ausbrandes ist der CO-Gehalt im Abgas. Bei vollständigem Ausbrand der Brenngase und damit auch größtmöglichem Wirkungsgrad der Feuerungsanlage erreicht der CO-Gehalt im Abgas sein Minimum. Diese bestmöglichen Ausbrandbedingungen werden dann erreicht, wenn das Verhältnis aus tatsächlich zugeführter Luftmenge und der für die vollständige Verbrennung der Gase theoretisch mindestens erforderlichen Luftmenge einen optimalen Wert annimmt. Diese Verhältniszahl wird als Luftüberschusszahl Lambda (λ) bezeichnet. Da Holz jedoch kein homogener Brennstoff ist (Feuchtegehalt, Schüttdichte, Holzart usw.) und sich damit sein Heizwert ständig ändern kann, ist die optimale Luftüberschusszahl Lambda im Verlauf eines Verbrennungsprozesses nicht konstant. Sie muss bei der Verbrennungsregelung ständig neu ermittelt und nachgeführt werden.

Der Zusammenhang von Sauerstoffangebot bzw. λ und Kohlenmonoxid ist bekannt und lässt sich zur Regelung einer Feuerung hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens nutzen. Die Abbildungen 5-11 und 5-12 zeigen schematisch die CO/Lambda-Charakteristik. Es existiert ein λ -Wert, bei dem die CO-Emissionen minimal sind. Je tiefer dieser λ -Wert liegt, umso besser ist die Feuerung hinsichtlich ihrer Durchmischungseigenschaften zu beurteilen. Der dazugehörige CO-Emissionswert ist ein Maß für die Einhaltung guter Ausbrandbedingungen als Folge

einer ausreichenden Verweilzeit und Verbrennungstemperatur sowie einer sauberen Trennung von Entgasungs- und Oxidationszone. Die Steigungen der Geraden geben außerdem Hinweise über das Emissionsverhalten der Feuerung bei An- und Abfahr- bzw. Regelungsvorgängen.

Derzeit werden auf dem Markt folgende Verbrennungsregelungen angeboten: Lambda-Regelung, CO-Regelung, CO/Lambda-Regelung, CO/Lambda-Regelung kombiniert mit Fuzzy-Logic und Prozessvisualisierung/Prozessleittechnik.

5.4.3.1 Lambda (λ)-Regelung

Bei der Lambda-Regelung wird versucht, einen für den Verbrennungsprozess optimalen Luftüberschuss im Abgas durch Regelung der Brennstoff- bzw. Primär- und Sekundärluftmenge konstant zu halten. Der Sollwert für den Luftüberschuss wird dabei abhängig von Leistung und Brennstoffeigenschaften fest vorgegeben. Bei Unter- bzw. Überschreitung des optimalen Luftüberschusses verschlechtern sich die Verbrennungsbedingungen. Außerdem ist der optimale Luftüberschuss nicht konstant, sondern schwankt bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen (Leistung, Brennstofffeuchte usw.).

Hierin liegt der Schwachpunkt dieser Regelung, die immer nur für eine Leistung bzw. Brennstoffqualität optimal eingestellt werden kann. In Abbildung 5-11 ist die Abhängigkeit der optimalen Luftüberschusszahl Lambda (λ) von Leistung und Brennstoffwassergehalt dargestellt.

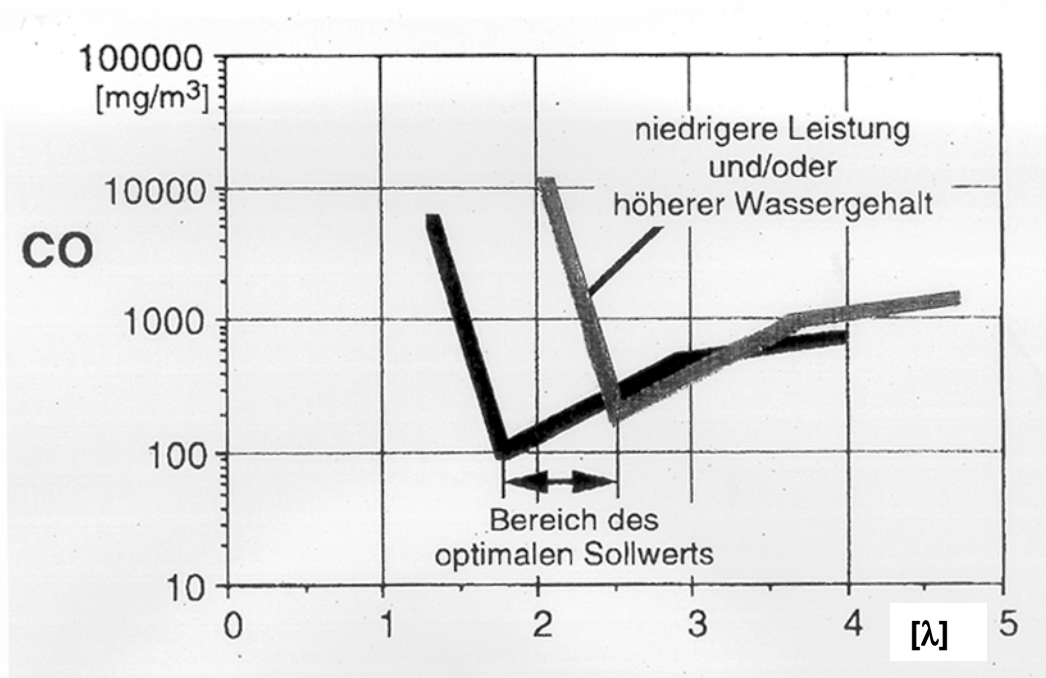


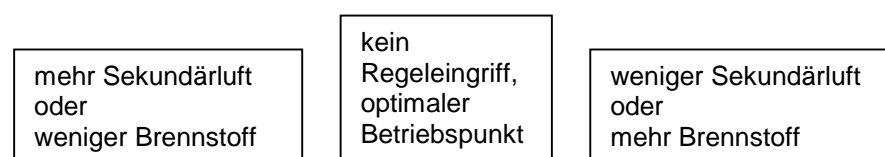
Abbildung 5-11: Verschiebung des optimalen Betriebspunktes durch erhöhten Wassergehalt oder reduzierte Leistung in der CO/Lambda-Charakteristik einer Holzfeuerung [Nus00].

5.4.3.2 CO-Regelung

Bei der CO-Regelung wird der CO-Gehalt direkt im Abgas gemessen. Bei stark schwankenden Betriebsbedingungen ist jedoch eine gleichbleibende Senkung der CO-Emissionen und die damit verbundene optimale Verbrennung nicht dauerhaft zu gewährleisten.

5.4.3.3 CO/Lambda-Regelung

Die CO/Lambda-Regelung stellt eine Kombination aus Lambda- und CO-Regelung dar. Hierbei werden sowohl der Luftüberschuss als auch der CO-Gehalt gemessen. Durch Kombination von CO- und Lambda-Regelung werden die jeweiligen Schwächen der Einzelregelungen weitgehend beseitigt. Bei Einsatz von CO/Lambda-Regelungen können Holzfeuerungsanlagen unabhängig von den sich ändernden Betriebsbedingungen (Brennstoffqualität, Leistung usw.) kontinuierlich bei optimalem Luftüberschuss und damit auch mit minimalen CO-Emissionen betrieben werden. Mit der CO/Lambda-Regelung steht ein Optimierungskonzept zur Verfügung, das es ermöglicht, bei gleichzeitiger Verbesserung des Feuerungswirkungsgrades die Schadstoffbildung erheblich zu reduzieren. CO/Lambda-Regelungen haben sich bereits seit Jahren im praktischen Einsatz bewährt. Abbildung 5-12 zeigt die Eingriffsbereiche der CO/Lambda-Regelung. In den Abbildungen 5-13 bis 5-14 ist das Funktionsprinzip der CO/Lambda-Regelung dargestellt.



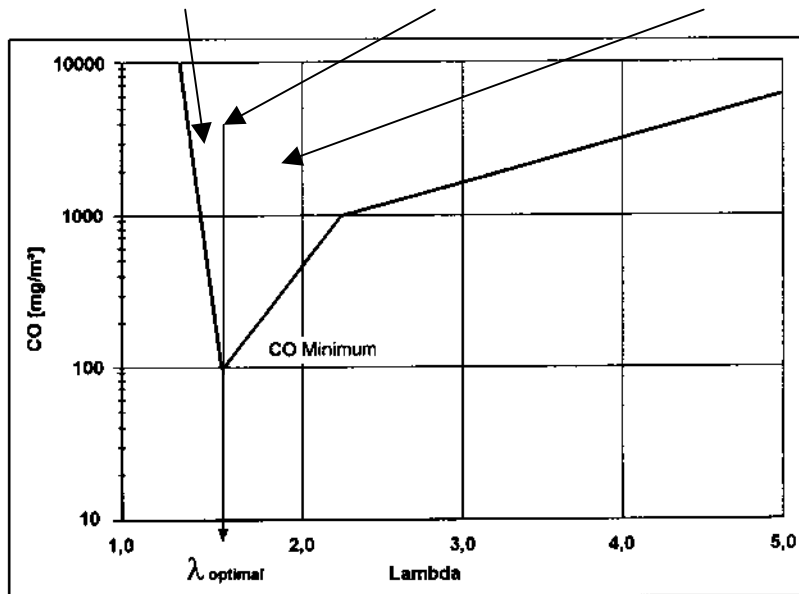


Abbildung 5-12: Schematische Darstellung der CO/Lambda-Charakteristik sowie der Eingriffsbereiche der CO/Lambda-Regelung [Mar99, Nus00]

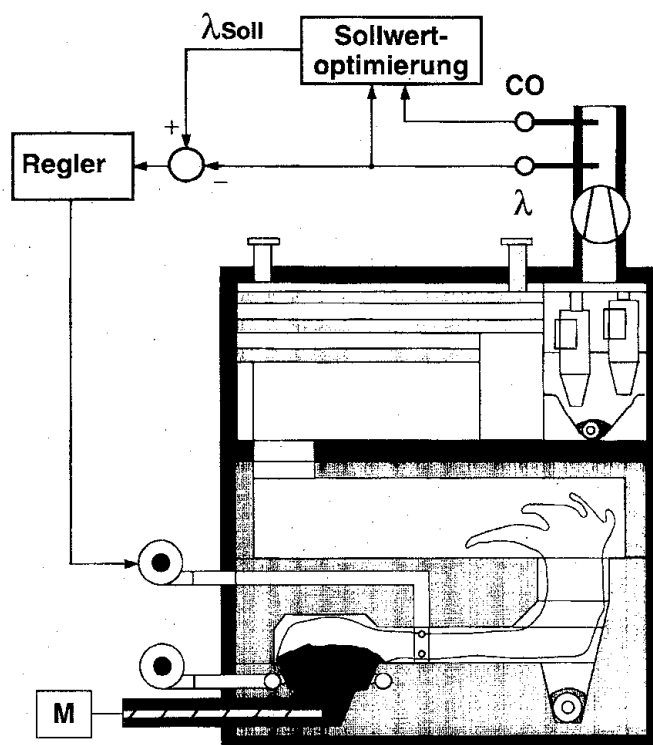


Abbildung 5-13: Schema der CO/Lambda-Regelung (ohne übergeordnete Leistungsregelung) [Nus00]

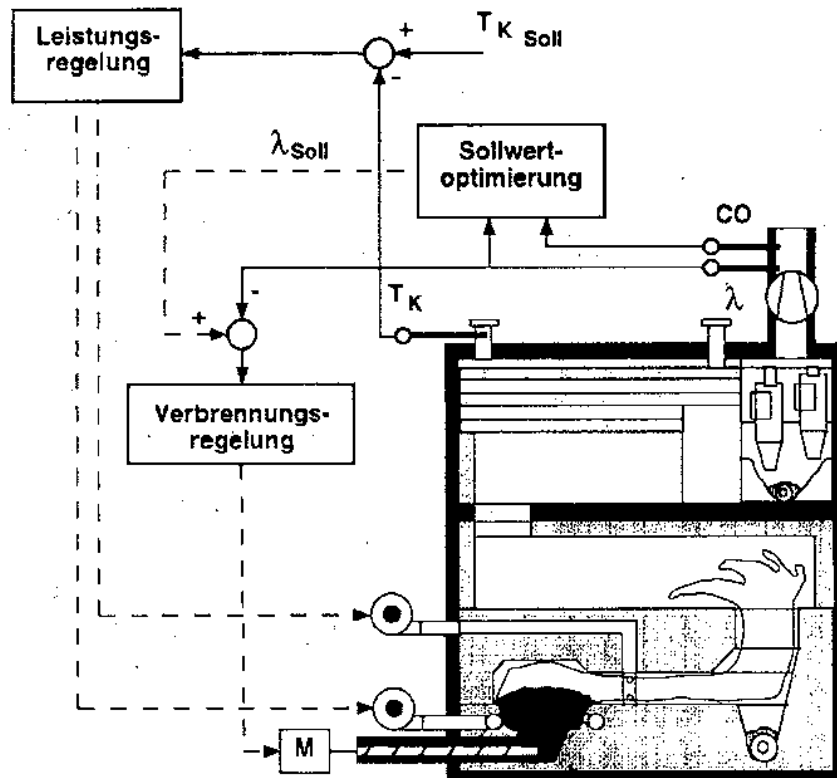


Abbildung 5-14: Funktionsprinzip der CO/Lambda-Regelung: Messung des Luftüberschusses und des CO-Gehalts. Optimierung des Lambda-Sollwertes. Regelung der Brennstoffmenge, Vorgabe der Verbrennungsluftmenge durch Leistungsregelung [Nus00].

5.4.3.4 CO/Lambda-Regelungen kombiniert mit Fuzzy-Logic

Bei der CO/Lambda-Regelung wird das Regelverhalten durch fest eingestellte Algorithmen bestimmt. Dies hat den Nachteil, dass spezielle anlagenspezifische Besonderheiten nicht immer optimal berücksichtigt werden können. Durch Fuzzy-Logic ist es dagegen möglich, durch unscharfe Prozessregelung eine optimale Feuerungsführung zu erreichen. Dabei werden nicht nur λ - und CO-Messwerte, sondern beliebig viele andere prozessbestimmende Größen wie z. B. Feuerraumtemperatur, Rest-O₂-Gehalt, Brennstoffzufuhr, Primärluftzufuhr usw. verarbeitet. Die Regelung durch Fuzzy-Logic befindet sich derzeit noch im Stadium der Erprobung.

5.4.3.5 Prozessvisualisierung / Prozessleittechnik

Um komplexe Gesamtsysteme zur energetischen Nutzung von Holz mit möglichst geringem Personalaufwand emissions- und kostenoptimiert dauerhaft betreiben zu können, ist der Einsatz von Systemen erforderlich, die alle relevanten Daten laufend erfassen, auswerten und selbständig in den Prozessablauf eingreifen. Ab einer Feuerleistung von 5 bis 10 MW ist

heute bereits die dafür erforderliche rechnergesteuerte Prozessleittechnik wirtschaftlich einsetzbar.

6 Luftreinhaltetechnik

Bei der Verbrennung von Holz werden die Verbrennungsprodukte hinsichtlich

- Produkten der vollständigen Verbrennung:
Kohlendioxid, Wasser, Aschepartikel
- Produkten der unvollständigen Verbrennung:
Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, Dioxine, Teer, Ruß, unverbrannte Partikel, Geruchsstoffe und
- Produkten aus Brennstoffverunreinigungen:
Stickstoffoxide, Schwefeloxide, Halogenkohlenwasserstoffe, Schwermetalle

unterschieden. Daraus ergeben sich hinsichtlich der Vermeidung der Produkte aus der unvollständigen Verbrennung primäre Minderungsoptionen durch Verbesserung des Ausbrandes und durch Selektion des Brennstoffs. Des Weiteren ergeben sich aus den Bildungsmechanismen der Stickoxide, die bei der Holzverbrennung nahezu ausschließlich dem Brennstoffstickstoff entstammen, Minderungsmaßnahmen über die Verbrennungsführung. Die Bildungsmechanismen für Ruß und Feinstaub erfordern zusätzlich Maßnahmen im Bereich der Abgasreinigung (Sekundärmaßnahmen).

6.1 Schadstoffbildung

6.1.1 Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid ist als Zwischenprodukt bei den Entgasungs- und Verbrennungsvorgängen auch in Holzfeuerungsanlagen unvermeidlich. Die dabei in der Flamme stattfindenden Vorgänge lassen sich schematisch durch folgende Reaktionen beschreiben, die in 3 Zonen ablaufen [Koz81]:

- Oxidationszone: exotherme Reaktion
$$\text{C} + \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2$$
- Reduktionszone: endotherme Reaktion
$$\text{CO}_2 + \text{C} \Leftrightarrow 2 \text{CO} \text{ (Boudouard-Gleichgewicht)}$$
- Oxidation durch Sekundärluft: exotherme Reaktion
$$2 \text{CO} + \text{O}_2 \Rightarrow 2 \text{CO}_2$$

Bei normalen Verbrennungsvorgängen verläuft die CO-Bildung durch die endotherme Reaktion in der Reduktionszone etwa 10 mal schneller als die nachfolgende Oxidation des CO durch Sekundärluft. Daraus ergibt sich, dass die Effizienz der CO-Oxidation und damit auch

die Höhe der im Abgas vorhandenen CO-Emissionen in erster Linie von der Menge und von der Art der zugeführten Sekundärluft abhängt.

6.1.2 Kohlenwasserstoffe

Der Sammelbegriff Kohlenwasserstoffe steht für eine Vielzahl organischer Verbindungen. Diese entstehen bei der Verbrennung von Holz im sauerstoffarmen Bereich der Flamme über entsprechende Kohlenwasserstoffradikale. Hinsichtlich der Emissionen bei Holzfeuerungsanlagen sind vor allem C₁-Verbindungen wie Methan und Methanal, C₂-Verbindungen wie Ethan, Ethen, Ethin und Ethanal (C₁- und C₂- Verbindungen machen bereits ca. 80 % der emittierten Gesamtmasse an Kohlenwasserstoffen aus) und C₆-Verbindungen wie Benzol (Anteil an der emittierten Gesamtmasse der Kohlenwasserstoffe zwischen 5 und 10 %) von Bedeutung. Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) treten auf Grund ihrer komplexen Molekülstruktur bezogen auf die Gesamtmasse der emittierten organischen Verbindungen dagegen nur in Spuren auf [Mar99].

6.1.3 Dioxine und Furane

Verbindungen der Stoffgruppe der Dioxine und Furane (PCDD/PCDF) entstehen in relevanten Größenordnungen immer dann, wenn der Grad des Ausbrandes niedrig ist. In solchen Fällen besteht die Möglichkeit, dass Chlor, das auch in naturbelassenem Holz in geringen Mengen (10 bis 300 mg/kg) vorhandenen ist, in Verbindung mit unverbranntem Kohlenstoff und Sauerstoff bei niedrigen Temperaturen zu PCDD/PCDF reagiert. Neben der Verunreinigung des Brennstoffes mit Dioxin-Vorläufersubstanzen (Präkursoren) - diese werden während der Verbrennung durch thermische Reaktion in Dioxine übergeführt - ist für die Dioxinbildung in Holzfeuerungsanlagen auch noch die sogenannte De-Novo-Synthese bedeutsam. Darunter wird die Neubildung von Dioxinen aus Abgasinhaltsstoffen beim Abkühlen im Temperaturbereich zwischen 250 und 450°C verstanden. Die Voraussetzungen für die Dioxinbildung (Anwesenheit von Chlor- und Kohlenstoffverbindungen sowie Sauerstoff) sind bei Holzfeuerungsanlagen immer gegeben. Das Potenzial der Dioxinbildung steigt allerdings mit zunehmendem Chlorgehalt im Brennstoff.

6.1.4 Stickstoffoxide

Bei der Entstehung von Stickstoffoxiden werden drei Bildungsarten unterschieden:

1. Prompt NO_x - entsteht durch vielfältige Vorgänge in der Flammenfront im Temperaturbereich oberhalb 1500°C
2. Thermisches NO_x – entsteht aus Luftsauerstoff und Luftstickstoff bei Temperaturen oberhalb 1300 °C

3. Bildung von NO_x aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff

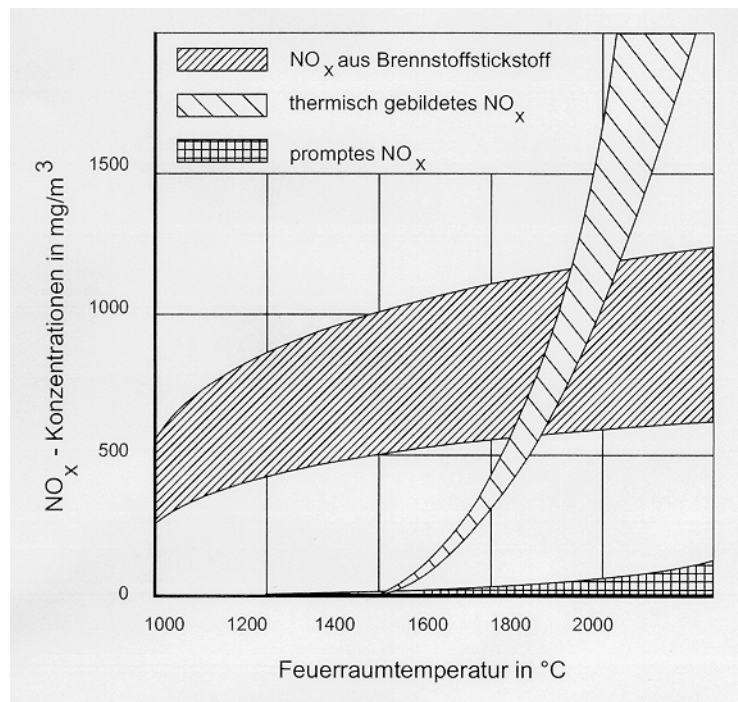


Abbildung 6-1: Darstellung der NO_x - Entstehung in Abhängigkeit von der Verbrennungstemperatur [FNR00]

Aus Abbildung 6-1 ist zu erkennen, dass bei den in Holzfeuerungsanlagen erreichbaren Verbrennungstemperaturen ($< 1200^\circ\text{C}$) die Höhe der entstehende NO_x -Konzentration im Wesentlichen durch die Menge des im Brennstoff gebundenen Stickstoffes bestimmt wird.

6.1.5 Schwefeldioxid

Schwefeldioxidemissionen sind bei Holzfeuerungsanlagen wegen des niedrigen Schwefelgehaltes von Holz (0,01 bis 0,1 Massen-%) nur von untergeordneter Bedeutung.

6.1.6 Partikel- bzw. Staubemissionen

Wie bei allen Feststofffeuerungen werden auch bei der Holzverbrennung Partikel mit dem Abgas emittiert. Bei guten Verbrennungsbedingungen handelt es sich dabei vorwiegend um mineralische Aschebestandteile mit einem aerodynamischen Partikeldurchmesser $< 10 \mu\text{m}$. Diese Feinstaubpartikel sind auf Grund ihrer Größe lungengängig und deshalb aus gesundheitlicher Vorsorge zu minimieren. Rauch aus Holzfeuerungsanlagen setzt sich neben Aschepartikeln und Partikeln aus unverbranntem Brennstoff auch aus Ruß und Kondensationsprodukten (Teer) zusammen, die sehr fein dispergiert sind und je nach Temperatur in festem oder flüssigem Zustand auftreten. Die Partikelgrößenverteilung im Abgas mechanisch

beschickter Holzfeuerungsanlagen mit Feuerungswärmeleistungen im Bereich 50 kW bis 1.000 kW ist in Tabelle 6-1 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass rund 70 % der emittierten Gesamtpartikelmasse aus Partikeln der Größenklasse $< PM_1$ mit aerodynamischen Durchmessern kleiner $1 \mu m$ besteht [IVD99].

Größenklasse	$< PM_1$	$< PM_{2,5}$	$< PM_{10}$
Anteil an der Gesamtmasse	70 %	79 %	92 %

Tabelle 6-1: Mittlere Anteile an der emittierten Gesamtpartikelmasse bei mechanisch beschickten Holzfeuerungsanlagen (Feuerungswärmeleistung 50 kW bis 1.000 kW) in den Größenklassen $< PM_1$, $< PM_{2,5}$ und $< PM_{10}$ [IVD99].

6.1.7 Ruß

Ruß entsteht z. B. durch Sauerstoffmangel im Bereich der Flammenwurzel. Er wird jedoch anschließend, je nach Güte der Ausbrandbedingungen, wieder mehr oder weniger vollständig verbrannt.

6.1.8 Teer

Teer entsteht als Kondensationsprodukt bei unvollständiger Verbrennung.

6.1.9 Geruchsstoffe

Der Geruch von Abgasen wird durch ein komplexes Gemisch verschiedenster Geruchsstoffe wie beispielsweise Aldehyde, organische Säuren, organische Kohlenwasserstoffe oder Schwefelverbindungen, die nur in geringsten Konzentrationen vorliegen und deren Wechselwirkungen untereinander weitgehend unbekannt sind, verursacht. Daher ist eine getrennte Erfassung einzelner Geruchsstoffe sowie deren Zuordnung zu einem bestimmten Geruch nicht möglich.

Weitgehend objektiv kann nur die Intensität eines Geruchseindrucks bestimmt werden. Die Qualität ist eine subjektive Größe, die auf der individuellen Reaktion des Wahrnehmenden beruht. Bei der Bestimmung der Intensität mit Hilfe der sogenannten Olfaktometrie wird eine Geruchsschwelle sowie eine relative Geruchskonzentration, die durch Geruchseinheiten (GE) gekennzeichnet wird, bestimmt. Dabei stellt die Geruchsschwelle diejenige Konzentration eines Stoffes dar, die bei 50 % der an der Olfaktometrie teilnehmenden Personen gerade eine merkliche Geruchsempfindung auslöst. Die relative Geruchskonzentration gibt das Verdünnungsverhältnis an, bis zu dem eine Geruchssprobe verdünnt werden muss, um deren Geruchsschwelle zu erreichen.

Beim Betrieb von Holzhackschnitzelfeuerungsanlagen und daher auch im Genehmigungsverfahren kommt der Geruchsproblematik eine hohe Bedeutung zu. Um die von Holzfeuerungsanlagen verursachten Geruchsemissionen und –immissionen abschätzen zu können, wurden im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Emissionsmessungen an 5 Feuerungsanlagen durchgeführt. Die ermittelten Geruchsstoffkonzentrationen (GE/m^3) sowie die abgeleiteten Emissionsfaktoren (GE/kWh) sind in der Tabelle 6-2 zusammengefasst.

Art der Feuerung	Nennwärmeleistung (kW)	Brennstoff	Geruchsstoffkonzentration (GE/m^3)	Emissionsfaktor (GE/kWh)
Automatisch beschickte Feuerung	3.000	Hackschnitzel, ca. 50 % Feuchte	70 - 280	100 – 600
Automatisch beschickte Feuerung	500	Hackschnitzel, ca. 50 % Feuchte	140 – 370	600 – 1.100
Handbeschickte Feuerung	150	Holzreste, lufttrocken	8.000 – 37.000	8.000 – 162.000
Handbeschickte Feuerung	120	Holzreste, lufttrocken	8.000 – 24.000	15.000 – 51.000
Handbeschickte Feuerung	60	Holzreste, lufttrocken	600 – 64.000	1.200 – 138.000

Tabelle 6-2: Geruchsstoffkonzentrationen und Emissionsfaktoren von Holzfeuerungsanlagen

Aus der Tabelle 6-2 ist zu erkennen, dass die spezifischen Geruchsemissionen von handbeschickten Feuerungsanlagen deutlich höher sind (ca. 1 – 2 Zehnerpotenzen), als die von mechanisch beschickten Feuerungen. Dies gilt auch bei neueren Anlagen, insbesondere während der Anbrandphase. Dennoch können auch bei handbeschickten Anlagen bei der kritischen Anbrandphase gute Werte erzielt werden (siehe Tabelle 6-2, letzte Zeile).

Der "typische Holzgeruch" tritt vor allem während der Schwelphase auf. Die Geruchsemissionen liegen dabei hoch ($> 10.000 \text{ GE}/\text{m}^3$). Bei günstigen Ausbrandbedingungen wird der Geruch als "stechend / chlorartig" wahrgenommen. Die Emissionen liegen dann bei ca. 100 – 1000 GE/m^3 .

6.2 Primärmaßnahmen zur Minderung der Schadstoffemissionen

6.2.1 Minderung von Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff-, Dioxin- und Furanemissionen

Werden beim Betrieb einer Holzfeuerungsanlage im Nennwärmeleistungsbereich erhöhte Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen gemessen, so ist in der Regel der Ausbrand gestört. Die Ausbrandeigenschaften von Holzfeuerungsanlagen sind im Wesentlichen

von der Feuerungstechnik, der Verbrennungsregelung und der Qualität des eingesetzten Brennstoffes abhängig. Eine Verbesserung der Ausbrandeigenschaften kann insbesondere durch Optimierung der Verbrennungstemperatur ($> 800\text{C}^\circ$), der Verweildauer der Brenngase im Feuerraum, ($> 2\text{s}$ bei 800 C°) und der Verwirbelung der Brenngase mit der Verbrennungsluft bei ausreichender Luftzufuhr erreicht werden.

Bei optimalen Ausbrandbedingungen ist es heute möglich, die CO-Konzentration im Abgas auf Werte unter 100 mg/m^3 zu senken [DFI99],[Mar99]. Untersuchungen des bayerischen Landesamtes für Umweltschutz an 9 Holzfeuerungsanlagen (5 Feuerungsanlagen mit Feuerungswärmeleistungen $> 1\text{ MW}$ und 4 Kleinfeuerungsanlagen) haben ergeben, dass bei CO-Gehalten im Abgas von $< 250\text{ mg/m}^3$ auch die Gesamt-C-Konzentrationen unter 20 mg/m^3 liegen [BLFU]. Die Emissionswerte für Kohlenwasserstoffe werden durch einen guten Ausbrand ebenfalls deutlich gesenkt und liegen bei optimierten Ausbrandbedingungen häufig bereits im Bereich der Nachweisgrenze von 1 bis 2 mg/m^3 [Mar99]. Außerdem wurde festgestellt, dass bei Senkung der CO-Konzentrationen im Abgas $< 100\text{ mg/m}^3$ insbesondere auch der Anteil polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe PAK (englische Bezeichnung PAH) - mit krebserzeugenden Potenzial - gemindert wird [BLFU, DFI99]. (Siehe hierzu auch Abschnitt 5.3 "Optimierung der Ausbrandbedingungen"). In Abbildung 6-2 ist die Emissionsfracht an PAK im Abgas von Holzfeuerungsanlagen in Abhängigkeit von der erzielten Ausbrandqualität dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit Verbesserung der Ausbrandqualität (niedrige CO-Konzentrationen im Abgas) auch die Emissionsfracht an PAK erheblich abnimmt [BLFU].

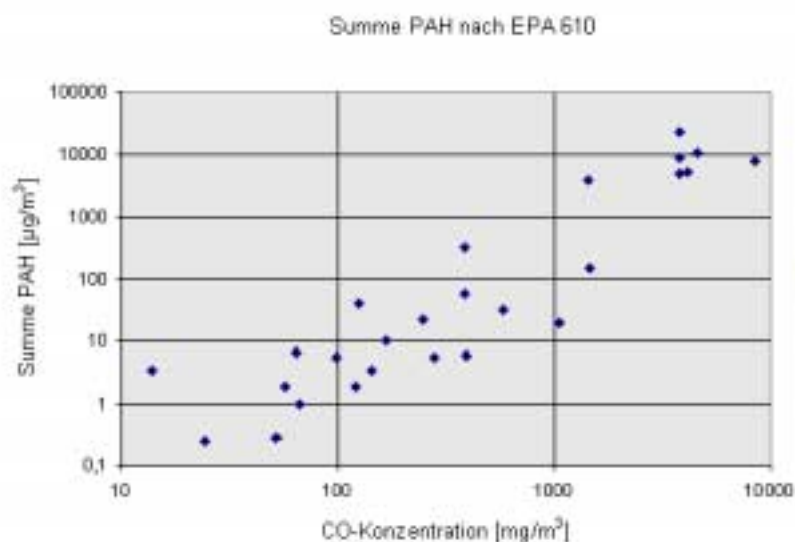


Abbildung 6-2: Emissionsfracht an PAK (englisch PAH) in Abhängigkeit von der Ausbrandqualität (CO-Konzentration) [BLFU].

Im Hinblick auf Dioxin- und Furanemissionen aus Holzfeuerungsanlagen ist neben der Verunreinigung des Brennstoffes mit Dioxin-Vorläufersubstanzen (Präkursoren), die sogenannte De-Novo-Synthese bedeutsam. Um Dioxinemissionen bei Holzfeuerungsanlagen gering zu halten, sind daher neben der Verwendung von naturbelassenem Holz - möglichst ohne Zusatzstoffe wie z. B. Streusalz (Dioxinbildung durch Chloreintrag) - Maßnahmen zur Verhinderung der De-Novo-Synthese (Minimierung der Verweildauer der Abgase im Temperaturbereich zwischen 250 und 450°C durch rasche Abkühlung) sowie die Sicherstellung eines optimalen Ausbrandes von entscheidender Bedeutung.

Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in dafür vorgesehenen Verbrennungsanlagen ist im Normalfall von einer PCDD/PCDF-Emission kleiner 0,1 Nanogramm TE/m³ auszugehen [BLFU, FNR00].

6.2.2 Minderung von Stickstoffoxidemissionen

Die wichtigsten Parameter für die Stickstoffemissionen bei Holzfeuerungsanlagen sind der Stickstoffgehalt des Brennstoffs, der Sauerstoffgehalt im Feuerraum und in der Ausbrandzone sowie der Ausbrandgrad der Brenngase. Die Verbrennungstemperatur hat bei gleichem Ausbrandgrad nur einen begrenzten Einfluss auf die NO_x-Bildung.

Zur Minderung der NO_x-Emissionen im Abgas werden heute bei Holzfeuerungsanlagen im Wesentlichen die nachfolgend beschriebenen Verfahren angewendet.

1. Abgasrückführung

Durch die Rückführung eines Abgasteilstromes in den Bereich der Flammenzone wird die Verbrennungstemperatur gesenkt. Außerdem wird der Sauerstoffgehalt in der Flamme reduziert. Unter optimalen Betriebsbedingungen ist durch Abgasrückführung eine NO_x-Minderungen bis ca. 10 % erreichbar [Mar99].

2. Gestufte Brennluftzufuhr

Eine gestufte Verbrennung liegt dann vor, wenn die Verbrennungsluft in mindestens 2 Stufen in die Feuerung eingebracht wird. Dabei wird die Primärluft im Brennraum leicht unterstöchiometrisch, die Sekundärluft in der Ausbrandzone dagegen überstöchiometrisch zugeführt. Außerdem ist eine geeignete Reduktionskammer erforderlich. Die Anwendung dieses Verfahrens ist allerdings nur bei gleichzeitigem Einsatz moderner Mess- und Regeltechnik erfolgversprechend. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz und optimalen Betriebsbedingungen ist durch gestufte Brennluftzufuhr eine NO_x-Minderungen bis 50 % zu erreichen [Mar99]. Die gestufte Verbrennung ist bei Feuerungsanlagen ab einer Wärmeleistung von ca. 500 kW wirtschaftlich vertretbar.

Bei der Verwendung naturbelassener Holzbrennstoffe sind NO_x -Konzentrationen zwischen 100 und 200 mg/m^3 im Abgas von Holzfeuerungsanlagen zu erwarten [Mar99].

6.2.3 Minderung von Staub bzw. Partikelemissionen

Holz enthält Spurenelemente wie Kalium und Calcium. Im Chlorophyll ist Magnesium enthalten. Die Holzasche besteht bei vollständiger Verbrennung ausschließlich aus den Oxiden dieser Metalle. Durch Kristallisation oder Clusterbildung fällt die Asche aus. In starken Luftströmungen werden solche Cluster zerstört. Dies trägt zur Feinstaubbildung bei.

Als Primärmaßnahmen zur Minderung von Feinstaub sind zu nennen:

- Hohe Feuerraumtemperaturen z. B. durch Vorwärmung der Verbrennungsluft.
- Geringer Luftüberschuss der Rauchgase, Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der Brennstoffschüttung durch gestufte Verbrennung und flächige Verteilung der Verbrennungsluft in diesem Bereich.
- Wahl geeigneter Brennstoffe
Möglichst trocken, gleichbleibende Körnung, geringer Feinanteil, ohne Zusatzstoffe wie z. B. Waldboden, keine Zumischung halmartiger Biomasse wie z. B. Stroh.

In der nachstehenden Tabelle 6-3 sind Brennstoffqualitäten und erreichbare Feuerraumtemperaturen mit bzw. ohne Verbrennungsluftvorwärmung im Zusammenhang dargestellt. Die Verbrennungsluftvorwärmung ist heute u. a. bei der Müllverbrennung gängige Praxis und dient dort zur Stabilisierung des Verbrennungsvorganges.

Bezeichnung	Lagerzeit ca.	Wassergehalt w	Heizwert kWh/kg
Waldfrisch, nass	0	60 %	1,68
Waldfrisch, grün	0-4 Wochen	50 %	2,3
Feucht	1-4 Monate	40 %	2,88
Halbtrocken	3-8 Monate	30 %	3,5
Trocken	2 Jahre	15 %	4,4
Darrtrocken	Nicht möglich	0 %	5,3

Wassergehalt w	Theoretische Temperaturdifferenz der Abgase	Mittlere Verbrennungstemperatur (Feuerraumtemperatur)	Wärmetransport durch Strahlung kW/m^2
60 %	720 K	380 °C	10
50 %	981 K	511 °C	21
40 %	1228 K	634 °C	38
30 %	1493 K	767 °C	66

15 %	1877 K	959 °C	130
0 %	2346 K	1193 °C	262
Bei Luftüberschuss $\lambda=2$		Zulufttemperatur 20 °C	Holztemperatur 300 °C

Wassergehalt w	Theoretische Temperaturdifferenz der Abgase	Mittlere Verbrennungstemperatur (Feuerraumtemperatur)	Wärmetransport durch Strahlung kW/m ²
60 %	720 K	637 °C	39
50 %	981 K	768 °C	66
40 %	1228 K	891 °C	104
30 %	1493 K	1024 °C	160
15 %	1877 K	1216 °C	278
0 %	2346 K	1450 °C	499
Bei Luftüberschuss $\lambda=2$		Zulufttemperatur 277 °C	Holztemperatur 300 °C

Tabelle 6-3: Brennstoffqualitäten und erreichbare Feuerraumtemperaturen mit bzw. ohne Verbrennungsluftvorwärmung [SWL00]

Aus Tabelle 6-3 folgt, dass relativ feuchte Hackschnitzel (Wassergehalt ca. 50 %) durch Verbrennungsluftvorwärmung auf 277 °C noch bei gleicher Feuerraumtemperatur verbrannt werden können wie "trockene" Hackschnitzel (Wassergehalt ca. 30 %) ohne Verbrennungsluftvorwärmung (Zulufttemperatur 20 °C).

Typische Partikelemissionen im Rohgas (vor der Rauchgasreinigung) von Holzhackschnitzelfeuerungsanlagen liegen heute meist im Bereich zwischen 200 und 800 mg/Nm³. In der Praxis können diese Emissionswerte jedoch auch über den angegebenen Bereich hinaus stark schwanken [FNR00].

6.3 Sekundärmaßnahmen zur Minderung der Schadstoffemissionen

6.3.1 Entstaubung der Abgase

Staubabscheidung erfolgt bereits in den Zügen des Kessels und der Brennkammer. Dennoch können auch bei guten Ausbrandbedingungen Partikelkonzentrationen > 150 mg/m³ im Abgas auftreten. In der Regel handelt es sich dabei um sehr feine Partikel (< 1µm), die nur durch nachgeschaltete Abscheider (Sekundärmaßnahmen) aus dem Abgas entfernt werden können.

Unvollständig verbrannte Brennstoffteilchen sowie grobe Aschepartikel können durch entsprechende Strömungsführung im Feuerraum zurückgehalten oder durch Fliehkraftabscheider wie Multizyklone nach dem Wärmetauscher aus dem Abgas entfernt werden.

Kritisch zu betrachten sind bei der Holzverbrennung die feinen lungengängigen Partikel < 10 µm. Sie entstehen abgesehen von mitgerissenen feinen Ascheteilchen meist bei der Abküh-

lung der Verbrennungsgase im Wärmetauscher und den Abgaswegen durch Kondensation gasförmiger Verbindungen. Die Feinstpartikel können bislang nur mit filternden Abscheidern wie Elektro- oder Gewebefilter nahezu vollständig aus dem Abgas entfernt werden.

Zur Entstaubung von Rauchgasen aus Holzfeuerungsanlagen stehen heute unterschiedliche Technologien zur Verfügung. Grundsätzlich wird dabei zwischen Trockenabscheidung [Gravitationsabscheider, Fliehkraftabscheider (Zyklone), elektrostatische Abscheider, filternde Abscheider (Gewebefilter)], Kondensationsabscheidung und Nassabscheidung (Abgaswäscher) unterschieden. Soweit Schwermetalle und schwerflüchtige organische Stoffe wie PAK und Dioxine partikelgebunden vorliegen, werden sie durch den Einsatz derartiger Systeme zusammen mit den Partikeln aus den Abgasen abgeschieden.

Die aufgeführten Abgasreinigungssysteme unterscheiden sich jedoch teilweise gravierend im Abscheidewirkungsgrad bei kleinen Partikeldurchmessern und in ihrer thermischen Belastbarkeit. Abbildung 6-3 zeigt im Überblick die Abscheideleistung der unterschiedlichen Systeme in Abhängigkeit von der Partikelgröße. In Abbildung 6-4 sind die Einsatzbereiche der verschiedenen Abscheidesysteme in Abhängigkeit von der Partikelgröße schematisch dargestellt. Tabelle 6-4 zeigt die Partikelgrößenverteilungen des Reingasstaubs bei unterschiedlichen Rauchgasreinigungskonzepten.

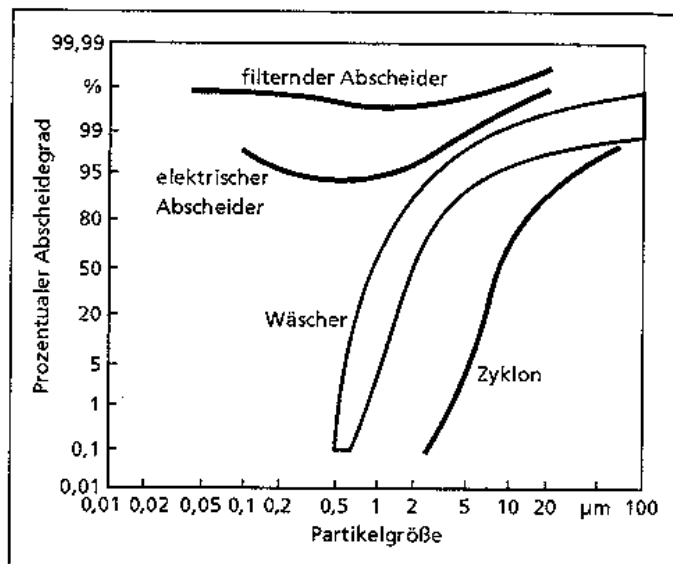


Abbildung 6-3: Abscheideleistung unterschiedlicher Abgasreinigungssysteme in Abhängigkeit von der Partikelgröße [Mar99]

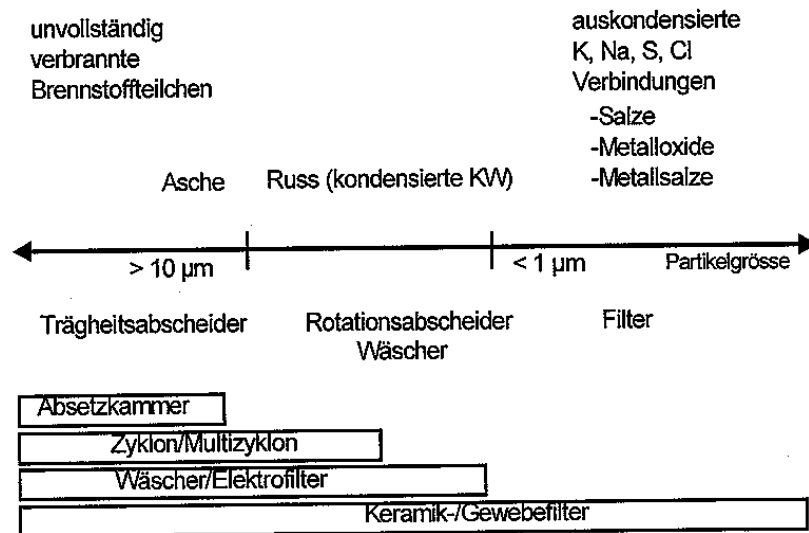


Abbildung 6-4: Zusammensetzung der Partikelemissionen aus Holzfeuerungen in Bereichen von Grob- und Feinstaub und mögliche Abscheider [IVD98].

Rauchgasreinigungskonzept	Größenklasse		
	$\leq 1 \mu\text{m}$	$\leq 2,5 \mu\text{m}$	$\leq 10 \mu\text{m}$
Multizyklon	52 %	70 %	97 %
Elektroabscheider	62 %	68 %	88 %
Multizyklon + Elektroabscheider	41 %	55 %	80 %
Multizyklon + Rauchgaskondensation	95 %	96 %	100 %

Tabelle 6-4: Partikelgrößenverteilung im Reingasstaub industrieller Holzfeuerungen [IVD99/1].

6.3.1.1 Fliehkraftabscheider (Zyklonabscheider)

Ein Zyklon besteht aus einem senkrecht stehenden und nach unten sich verjüngenden Zylinder. Ein Multizyklon besteht aus mehreren, parallel durchströmten Zyklonen. Durch die tangentielle Zuführung des Rohgases in den Zyklon kommt es zu einer Rotationsbewegung des Gases. Schwere Staubpartikel werden dadurch in Folge der Fliehkraft an den Außenrand geschleudert, abgebremst und rutschen schließlich in den am unteren Ende befindlichen Auffangbehälter. In Abbildung 6-5 ist das Funktionsprinzip eines Zyklonabscheiders dargestellt.

Mit Multizyklon-Hochleistungsabscheidern lassen sich Reingaswerte nach Holzfeuerungsanlagen von $< 150 \text{ mg/m}^3$ Staubgehalt erreichen. Die Staubabscheidung mittels Fliehkraftabscheider (Zyklon) gehört heute zum Standardzubehör jeder Holzfeuerungsanlage.

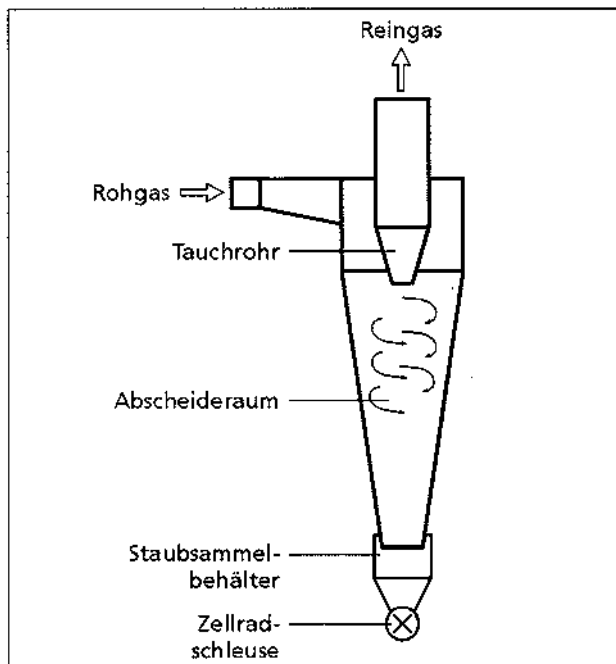


Abbildung 6-5: Schematische Darstellung eines Zyklon-Staubabscheiders [Mar99]

6.3.1.2 Elektrofilter

In Elektrofiltern erfolgt die Partikelabscheidung durch die Wirkung elektrostatischer Kräfte. Die zwischen Sprüh- und Niederschlagselektroden angelegte hohe Gleichspannung von 30 bis 60 kV führt zur Korona-Entladung und damit zur Aufladung von Staub oder Aschepartikeln. Auf Grund der entstehenden Coulomb-Kraft werden die im Rohgas vorhandenen Staubteilchen nach außen gezogen und an den Niederschlagselektroden abgeschieden. Dort bleiben sie haften und müssen in periodischen Zeitabständen abgereinigt werden. Abbildung 6-6 zeigt das Funktionsprinzip eines Elektrofilters. Nach VDI 3678 Blatt 1 liegt der Energiebedarf von Elektrofiltern bei 0,1- 0,5 kWh pro 1000 m³ zu reinigendem Abgas.

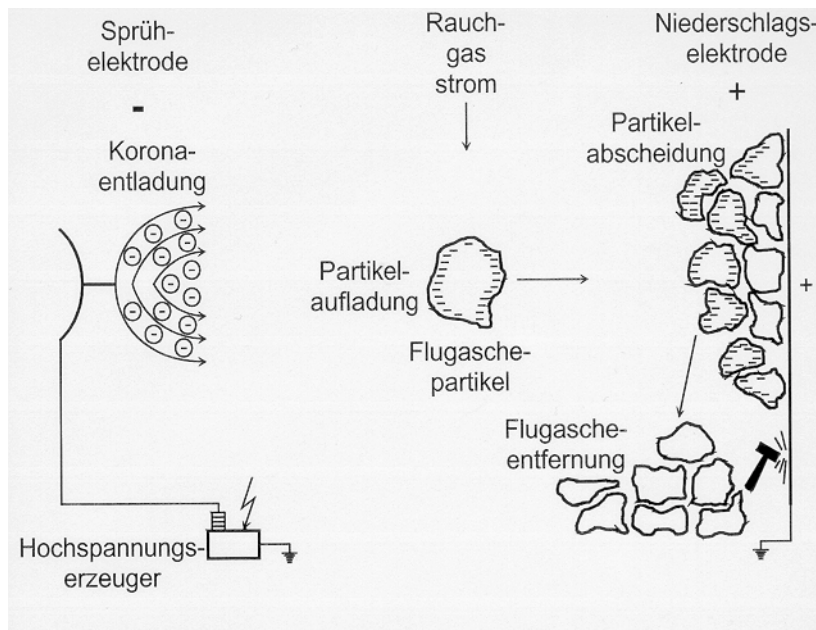


Abbildung 6-6: Funktionsprinzip eines Elektrofilters [FNR00]

Elektrofilter sind zur Entstaubung von Abgasen aus Holzfeuerungsanlagen gut geeignet. Die Investitionskosten sind jedoch verglichen mit Multizyklonen wegen des notwendigen großen technischen Aufwandes höher. Auch der Platzbedarf ist vergleichsweise hoch. Außerdem kann die Gefahr von Filterbränden und Filterexplosionen nicht völlig ausgeschlossen werden. Zur Vermeidung von Dioxinbildung durch die De-Novo-Synthese sollte die Betriebstemperatur von Elektrofiltern immer unterhalb von 200°C gehalten werden. In Abbildung 6-7 ist der Aufbau eines Elektrofilters schematisch dargestellt.

Mit Elektrofiltern lassen sich nach Holzfeuerungsanlagen Reingasstaubgehalte zwischen 10 und 50 mg/m³ erreichen.

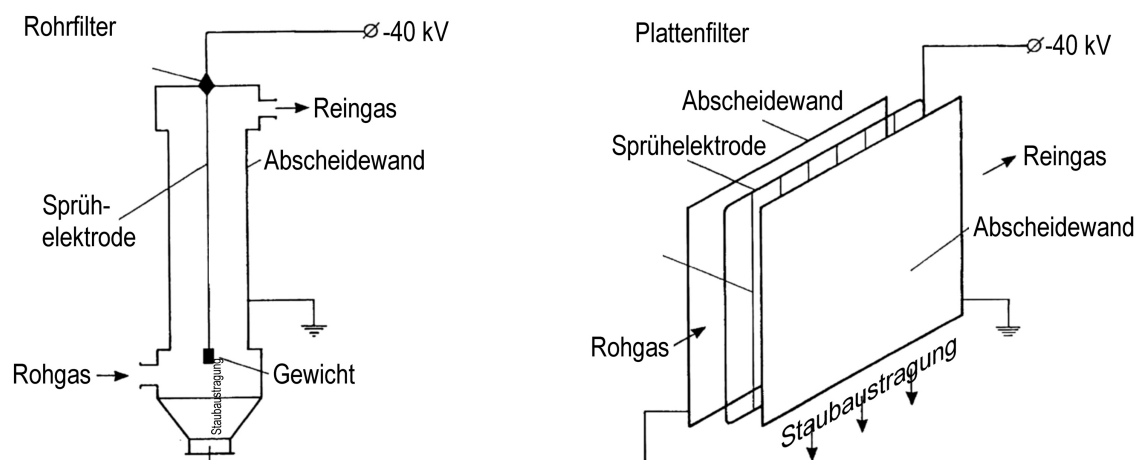


Abbildung 6-7: Prinzipieller Aufbau von Elektrofiltern [SWL00]

6.3.1.3 Filternde Abscheider (Gewebefilter)

Das Wirkungsprinzip von Gewebefiltern besteht darin, dass das staubhaltige Rohgas durch ein poröses Medium geleitet wird. Das Gewebefilter ist in Aufbau und Wirkungsweise komplizierter und aufwändiger als das Elektrofilter oder gar der Fliehkraftabscheider. Am häufigsten werden Gewebefilter als sogenannte Schlauchfilter ausgeführt, da hier der erforderliche Platzbedarf im Vergleich zur Filteroberfläche gering ist. Schlauchfilter bestehen aus einer Reihe senkrecht angeordneter Filterschläuche, in deren Innern ein Unterdruck herrscht. Das Rohgas durchströmt die Filterschläuche von außen nach innen, so dass sich die Staubteilchen an der Außenseite als Filterkuchen ablagern. Da der Filterkuchen und damit verbunden auch der Abgaswiderstand (Druckverlust) während des Reinigungsvorganges ständig zunehmen, muss das Filter in regelmäßigen Abständen abgereinigt werden. Dies kann mechanisch durch Rütteln oder Klopfen oder pneumatisch durch Rückspülen mit Druckluftstößen erfolgen. Gewebefilter zeichnen sich durch hohe Entstaubungsleistungen aus. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Additivzugabe zur Abscheidung von Spurenstoffen wie z. B. Dioxine, PAH oder Schwermetalle. Die Investitionskosten je 1000m³ zu reinigendem Abgas liegen zum Teil deutlich unter denen vergleichbarer E-Filter. Mit Gewebefiltern lassen sich nach Holzfeuerungsanlagen Reingasstaubgehalte von < 10 mg/m³ erreichen. Abbildung 6-8 zeigt die Funktionsweise eines Gewebefilters (Schlauchfilter).

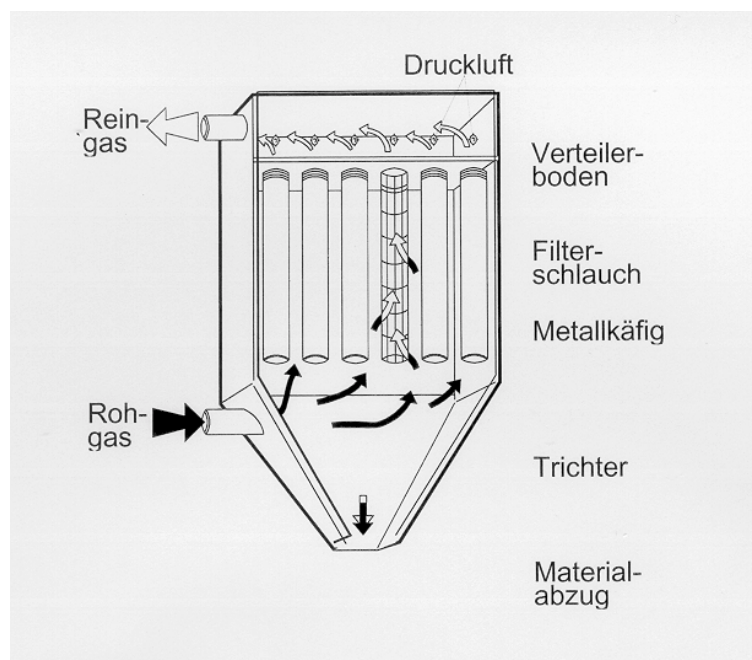


Abbildung 6-8: Funktionsweise eines Gewebefilters (Schlauchfilter) [FNR00]

Bei der Entstaubung von Abgasen aus Holzfeuerungsanlagen mittels Gewebefilter besteht jedoch die Gefahr von Glimmbränden durch Funkenflug. Bei der Verwendung von Schlauch-

filtern sind daher Zusatzeinrichtungen wie Wärmetauscher, Zyklon-Vor-Entstauber und Funkenlöschanlage erforderlich. Die typischen Einsatztemperaturen von Gewebefiltern hinter Holzfeuerungsanlagen liegen zwischen 120 und 240 °C. Die untere Temperaturgrenze darf nicht unterschritten werden, um eine Taupunktunterschreitung und damit ein Verkleben/Verstopfen des Filters zu vermeiden. Bei Überschreitung der oberen Temperaturgrenze besteht die Gefahr der Schädigung des Filtergewebes. Als Gewebematerial werden organisch-synthetische oder mineralische Fasern verwendet. Die Filtermaterialien haben allerdings unterschiedliche Beständigkeiten gegenüber Temperatur und aggressiven Medien. Gewebefilter können auch bei deutlich höheren Temperaturen eingesetzt werden. Die Kosten für die dazu erforderlichen Materialien sind für den Anwendungsfall von Holzfeuerungsanlagen jedoch sicherlich zu hoch. In Tabelle 6-5 sind gebräuchliche Filtermaterialien zur Abgasreinigung hinter Holzfeuerungsanlagen zusammengestellt.

Filtermaterial [Handelsnamen]	Temperatur [°C]	Beständigkeit gegen			
		Hydrolyse	Säuren	Alkalien	Oxidation
Polyphenylsulfid	180	1	2	2	4
Aramid [Nomex]	180	1	1	1	4
Glas (silikonisiert)	250	1	2	3	1
PTFE [Teflon]	250	1	1	1	1
PTFE/Glas	260	1	2	3	1
Polymid [pi 84]	240	2	2	3	1
Nickellochfolien	350	1	2	1	1
Edelstahlfasern	350	1	2	1	2

1= sehr gut 2= gut 3= bedingt 4= schlecht

Tabelle 6-5: Gebräuchliche Filtermaterialien zur Abgasreinigung hinter Holzfeuerungsanlagen
[SWL00]

6.3.1.4 Rauchgaskondensationsanlagen

Rauchgaskondensationsanlagen ermöglichen eine Wärmerückgewinnung aus Biomassefeuerungen. Bevor das aus der Feuerungsanlage kommende Rauchgas in eine Kondensationsanlage eingeführt wird, muss es üblicherweise in einem Multizyklon entstaubt werden. Die Kondensationsanlage wird in der Regel dreistufig ausgeführt. In der ersten Stufe, dem Economiser, erfolgt eine Rückgewinnung der fühlbaren Wärme aus dem Rauchgas. Das Rauchgas wird dabei durch Wärmeaustausch mit dem konventionellen Netzzrücklauf auf etwa 70 °C abgekühlt. Es erfolgt keine Kondensation.

Im Kondensator, der zweiten Stufe, erfolgt dann ein Wärmeaustausch zwischen Rauchgas und Niedertemperaturnetzrücklauf. In dieser Stufe wird das Rauchgas unter seinen Taupunkt gekühlt, wodurch neben der fühlbaren auch ein Teil der in den Rauchgasen enthaltenen latenten Wärme energetisch genutzt werden kann. Je tiefer das Rauchgas in dieser Stufe abgekühlt werden kann, desto effektiver arbeitet die Rauchgaskondensationsanlage.

Die Austrittstemperatur des Rauchgases aus der Kondensationsstufe hängt von der wasserseitigen Kühlleistung, die bereitgestellt werden kann, ab.

Nach einer Umlenkung durch die Kondensatwanne erfolgt dann die Durchströmung der dritten Anlagenstufe, des Luftvorwärmers. Die Rauchgasführung von unten nach oben ist wesentlich, weil dadurch das auskondensierende Wasser im Gegenstrom zum Rauchgas fließt und eine Reinigung der Wärmetauscherrohre bewirkt.

Die weitere Abkühlung des Rauchgases erfolgt durch eine Vorwärmung der angesaugten Umgebungsluft. Diese vorgewärmte Luft wird zu einem geringen Teil als Verbrennungsluft und zum größten Teil als Entschwadungsluft verwendet. Die Entschwadungsluft wird dann dem bei 30 bis 40 °C aus der Luftvorwärmerstufe austretenden wassergesättigten Rauchgas beigemischt, sodass eine Kondensation in den Leitungen vermieden und das Rauchgas soweit verdünnt wird, dass es am Kaminaustritt zu keiner Wasserdampfschwadenbildung mehr kommt.

Ein weiterer Vorteil neben der Wärmerückgewinnung und der möglichen Entschwadung des Rauchgases ist, dass durch die Kondensation auch eine effiziente Entstaubung des Rauchgases erfolgt. Staubmessungen und Betriebsdaten von Rauchgaskondensationsanlagen an Biomassefernhelzwerken in Österreich haben Staubabscheidungen zwischen 60 und 85 % bezogen auf die Staubmenge des in die Kondensationsanlage eintretenden Gases ergeben [Obe98].

Durch diese Abscheideleistung beträgt der Reststaubgehalt $< 50 \text{ mg/m}^3$. Sind noch niedrigere Reststaubgehalte im Reingas erforderlich, so kann der Rauchgaskondensationsanlage ein Aerosol-Elektrofilter nachgeschaltet werden, das aufgrund der niedrigen Gastemperaturen und der wasserdampfgesättigten Gasatmosphäre sehr klein und damit preiswert dimensioniert werden kann. Durch derartige Filter lassen sich Reststaubgehalte von $< 10 \text{ mg/m}^3$ erzielen.

Außerdem wird durch die Kondensation eine zusätzliche Minderung von wasserlöslichen Schadgasen und Geruchsstoffen im Abgas erreicht. Als Nachteil ist die möglicherweise erforderliche Abwasserbehandlung (Abgaspartikel fallen als Schlämme an) zu nennen.

Das aufwändige Verfahren der Rauchgaskondensation ist nur bei der Verwendung relativ feuchter Brennstoffe (z. B. Holzhackschnitzel mit Wassergehalten größer 30 %) sinnvoll. Je

feuchter der Brennstoff, desto besser ist die Wirtschaftlichkeit des Kondensators. Eine weitere Voraussetzung für den wirtschaftlichen Betrieb von Rauchgaskondensationsanlagen ist eine möglichst niedrige Rücklauftemperatur im Fernwärmesystem (ca. 40 °C).

6.3.1.5 Nassabscheider

Nassabscheider spielen bei der Staubabscheidung nach Holzfeuerungsanlagen eine eher unbedeutende Rolle. Dennoch sind sie für kleine bis mittlere Anlagegrößen lieferbar. Sie sind gut anpassungsfähig und für wechselnde Betriebsbedingungen geeignet. Die Abscheideleistung von Nassabscheidern ist höher als die von Fliehkraftabscheidern, aber geringer als bei Gewebefilter- bzw. Elektrofilteranlagen. Nach Holzfeuerungsanlagen lassen sich mit dieser Technik Reingasstaubgehalte von $< 50 \text{ mg/m}^3$ erreichen. Im Unterschied zur Rauchgaskondensation (Waschflüssigkeit entsteht durch die Kondensation des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfes) wird hier die Waschflüssigkeit über ein Düsensystem eingebracht.

Ein Vorteil von Nassabscheidern ist die zusätzliche Minderung von wasserlöslichen Schadgasen und Geruchsstoffen im Abgas. Als Nachteile sind die erforderliche Abwasserbehandlung (Abgaspartikel fallen als Schlämme an), die relativ hohen Betriebskosten und der zur Vermeidung von Wasseraerosolen notwendige zusätzliche Tropfenabscheider zu nennen.

In Abbildung 6-9 sind typische Bauformen von Nassabscheidern dargestellt.

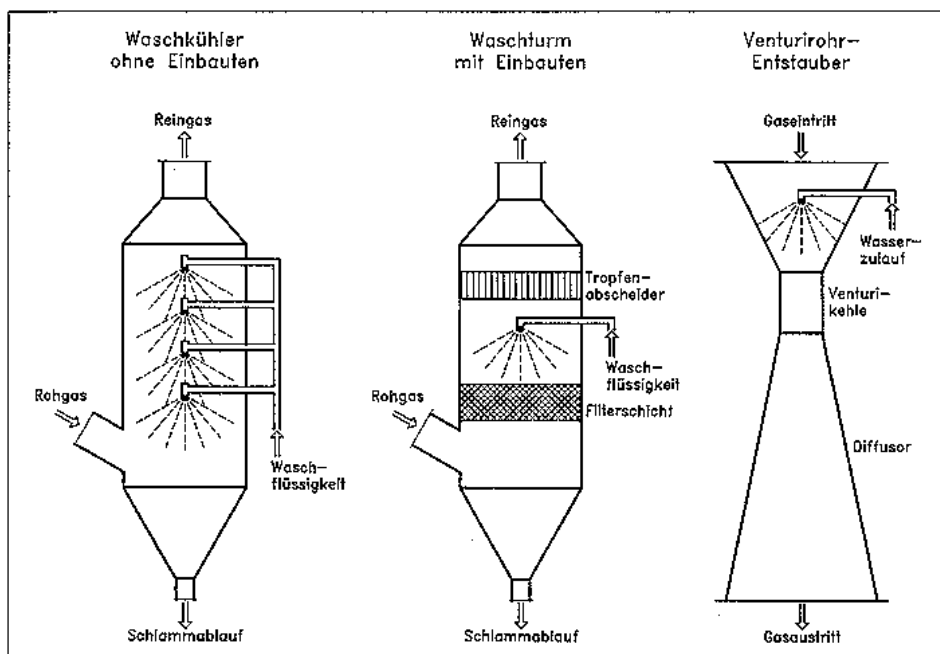


Abbildung 6-9: Typische Bauformen von Nassabscheidern zur Entstaubung von Abgasen [Mar99]

7 Siloanlagen

Da die Energiedichte von Holzbrennstoffen bezogen auf Gewicht und Volumen um den Faktor 2 bis 6 niedriger ist als z. B. bei leichtem Heizöl, spielen Brennstofflager bei Holzfeuerungsanlagen eine weitaus bedeutendere Rolle als bei vergleichbaren Ölfeuerungen. Für die Lagerung von Holzbrennstoffen wird dabei zwischen großen Brennstofflagern zur längerfristigen Bevorratung (Hauptlager meist nicht direkt bei der Heizanlage) und kleineren Zwischenlagern (Brennstoffsilos) in unmittelbarer Nähe zur Feuerungsanlage unterschieden.

Bei Feuerungsanlagen mit großem Hackschnitzelverbrauch ($>5000 \text{ m}^3/\text{a} \hat{=} \text{ca. } 2 \text{ MW FWL}$) wird der Brennstoff zunächst im Freien auf befestigten Plätzen oder in Hallen gelagert und erst nach Bedarf mittels Radlader oder Kran in das Silo eingefüllt.

Die Brennstoffbeschickung der Feuerung selbst erfolgt in der Regel aus dem Silo mittels automatischen Beschickungseinrichtungen.

Bei Aufteilung des externen Brennstofflagers in verschiedene Bereiche können die unterschiedlichen Brennstofffraktionen nach Feuchtigkeit, Feinanteil, Holzsorte usw. getrennt gelagert werden. Dadurch ist es möglich, das Silo immer mit einer für die Feuerung optimalen Brennstoffmischung zu beschicken und somit den Heizwert des Brennstoffes nahezu konstant zu halten. Abbildung 7-1 zeigt Möglichkeiten für die Integration eines Brennstofflagers in ein Gebäude.

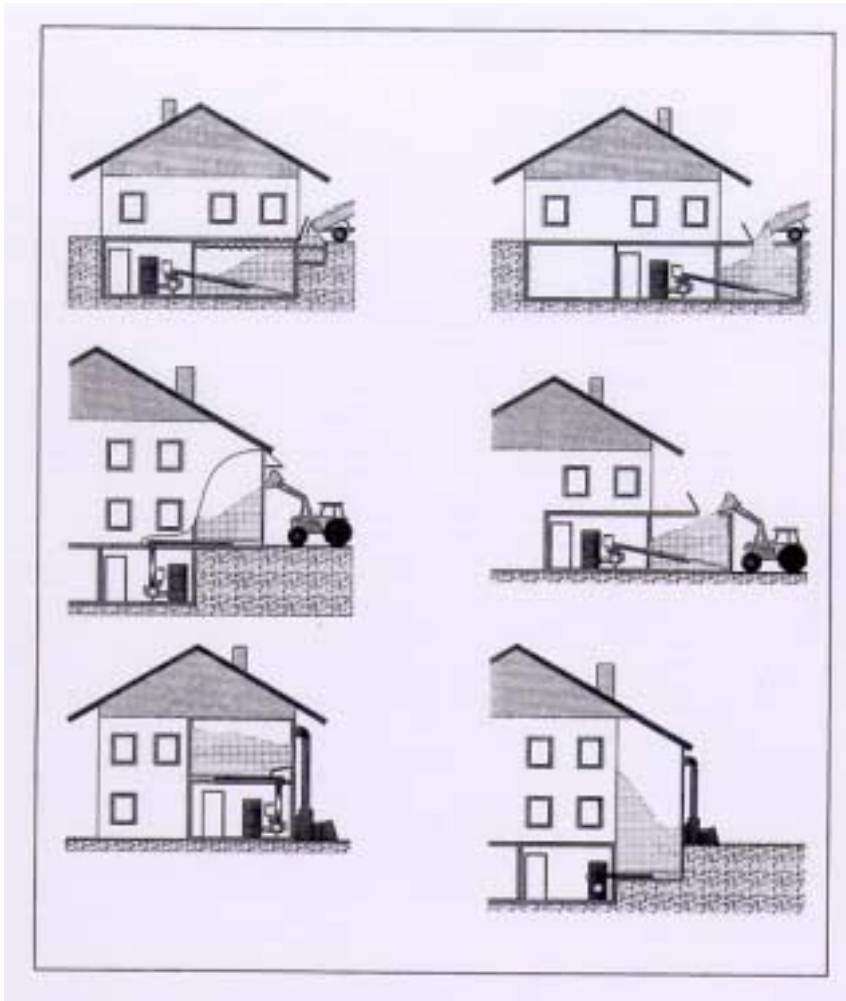


Abbildung 7-1: Möglichkeiten für die Integration eines Vorratsbehälters in ein Gebäude [Mar99]

7.1 Unterflursilos

Bei Holzhackschnitzelfeuerungsanlagen zur kommunalen und privaten Wärmeversorgungen sind Unterflursilos die am häufigsten eingesetzte Bauform.

Die rationelle und flexible Beschickungsmöglichkeit z. B. durch landwirtschaftliche Fahrzeuge (Radlader usw.) sowie der Einsatz bewährter und robuster Technik bei der Siloaustragung sind entscheidende Vorteile dieser Siloart. Nachteilig wirken sich die relativ hohen Baukosten aus (Erdaushub, statische Anforderungen an die Silowände durch den Erddruck und den Anlieferverkehr). Zur rationellen Beschickung des Unterflursilos ist außerdem eine ausreichend bemessene Verkehrsfläche erforderlich (ca. 15m rechtwinklig zur Silokante).

Unterflursilos werden am häufigsten in Rechteckform gebaut. Markante Unterschiede in der Ausführung sind dabei die Form der Füllöffnung, die Art der Austragung sowie die Schnitzelverteilung innerhalb des Silos.

7.2 Hochsilo

Hochsilos werden aus großformatigen Stahlbeton-Fertigteilen oder vor Ort in Beton mit Gleitschalung errichtet. Von ihrer Funktion her ergeben sich zwischen den verschiedenen Bauweisen keine Unterschiede. Mit Gleitschalung vor Ort errichtete Silos sind in der Regel billiger, die in Fertigteilbauweise errichteten Silos benötigen dagegen eine deutlich kürzere Bauzeit und führen so zu geringeren betrieblichen Einschränkungen. Außerdem können derartig errichtete Hochsilos problemlos versetzt, demontiert oder durch Aufstockung vergrößert werden. Hochsiloanlagen werden bis 35 m Höhe und 12 m Durchmesser gebaut.

Bei der Befüllung von Hochsilos werden die Hackschnitzel oben in das Silo eingeblasen. Eine weitere Möglichkeit ist die Beschickung mittels Pumpwagen. Dabei werden die Hackschnitzel pneumatisch in das Silo befördert. Auf Grund dieser aufwändigen Beschickung ist der Einsatz von Hochsilos im Wesentlichen auf Industrie und Gewerbe beschränkt.

In Abbildung 7-2 ist ein Hochsilo mit Austragvorrichtung schematisch dargestellt.

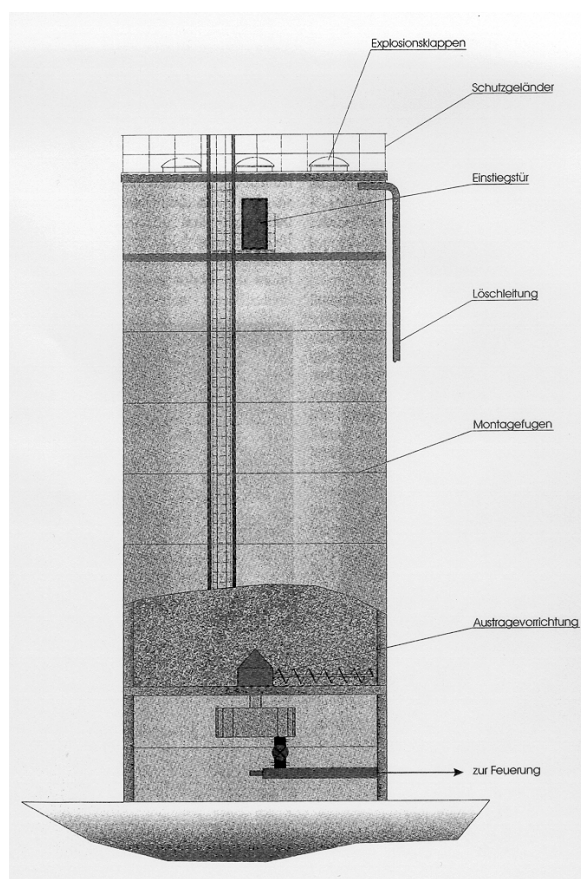


Abbildung 7-2: Hochsilo mit Austragvorrichtung [Mar99]

7.3 Siloaustragsysteme

Siloaustragsysteme haben die Aufgabe, entsprechend den Leistungsanforderungen der Feuerungsanlage den Brennstoff aus dem Silo zu fördern und der Feuerung zuzuführen. Voraussetzung für die automatische Beschickung ist allerdings, dass eine günstige Schüttfähigkeit des Brennstoffs gewährleistet wird. Ein erhöhter Rindenanteil im Brennstoff, wie er vor allem bei Hackschnitzelsortimenten aus Landschaftspflegeholz auftritt, kann z. B. auf Grund des früher eintretenden Zersetzungsprozesses von Rinde bei längerer Lagerung zu Verklebungen führen und dadurch die Fließ- und Schüttfähigkeit des Hackguts reduzieren.

Ein weiteres Problem bei der Lagerung und dem Transport des Hackguts innerhalb des Heizwerks kann durch die Neigung des Brennstoffs zur Brückenbildung entstehen. Vor allem Hackgut mit heterogener Größenverteilung neigt dazu, sich in Lagerräumen oder Austragsvorrichtungen zu verkeilen und somit Verstopfungen herbeizuführen.

Neben den Brennstoffeigenschaften (Stückigkeit, Wassergehalt, Rindenanteil usw.) ist die Geometrie des Silos für die Wahl des geeigneten Austragsystems von entscheidender Bedeutung.

Schubbodenaustrag

Der Schubboden eignet sich für alle Brennstoffe in großflächigen und rechteckigen Silos. Dabei werden Schubstangen über dem Boden hydraulisch vor- und zurückbewegt. An den Schubstangen befinden sich in kurzen Abständen keilförmige Querstangen, die bei der Vorwärtsbewegung den Brennstoff nach vorne mitnehmen und sich bei der Rückwärtsbewegung unter den Brennstoff schieben. Dadurch wird der gesamte Brennstoff in eine quer verlaufende Rinne geschoben, in der eine Schnecke oder ein Kratzkettenförderer den Weitertransport zur Feuerungsanlage übernimmt [Leit98]. In Abbildung 7-3 ist ein Schubbodenaustragsystem schematisch dargestellt.

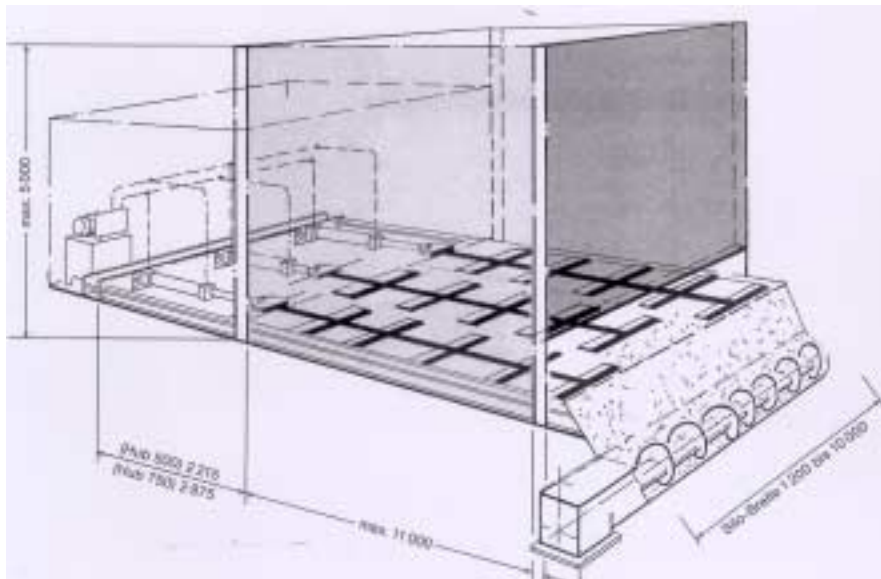


Abbildung 7-3: Schubboden im rechteckigen Silo [See89]

Schneckenaustrag

Der Schneckenaustrag eignet sich für sehr trockenen Brennstoff aus runden oder quadratischen Hochsilos. Dabei wird die Schnecke beispielsweise am Boden des Silos kreisförmig bewegt, so dass sie den größten Teil des Silobodens bestreicht und damit den Brennstoff zur Mitte hin transportiert. Dort fällt der Brennstoff durch eine Öffnung nach unten in die Förderschnecke, die den Weitertransport in den Feuerraum übernimmt. In Abbildung 7-4 ist eine Austragvorrichtung mittels Drehschnecke schematisch dargestellt.

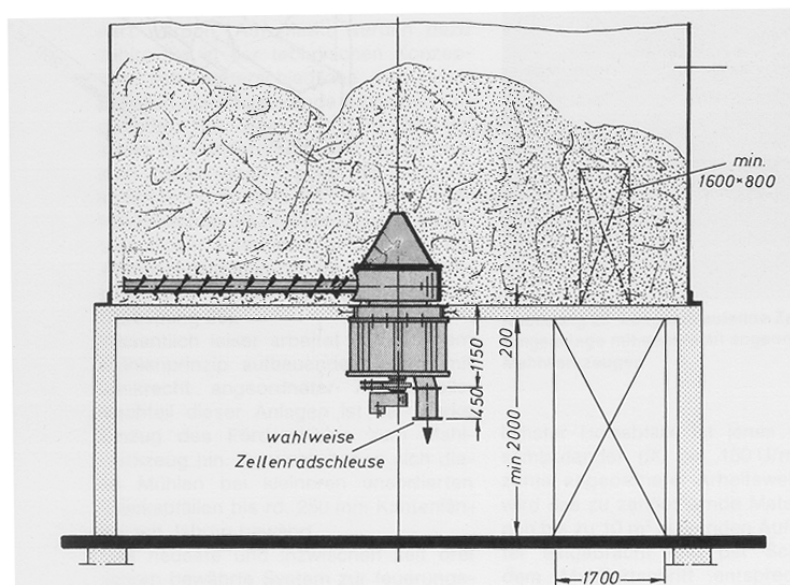


Abbildung 7-4: Austragvorrichtung mittels Drehschnecke [See89]

7.4 Geruchsbildung bei Holzhackschnittzelsilos

Die Geruchsbildung bei der Lagerung von Holzhackschnittzeln wird von verschiedenen Parametern beeinflusst. Dabei sind neben der Silobauart die Brennstoffeigenschaften (Wassergehalt, Struktur, Holzart usw.) von entscheidender Bedeutung. Auch die Dauer der Lagerung beeinflusst die Intensität der Geruchsbildung [SWL00].

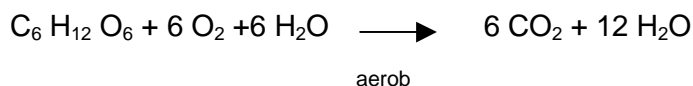
Auftretende Gerüche können verschiedene Ursachen haben:

a) Stoffeigene Gerüche

Der Eigengeruch von Holz spielt als Belästigung keine Rolle. In Abhängigkeit von Holzart und Wassergehalt sowie vom Trocknungsprozess im Silo können durch die ätherischen Öle des Holzes wahrnehmbare Geruchseinheiten auftreten.

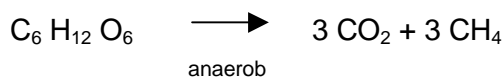
b) Biochemisch entstehende Gerüche

Betrachtet man den Abbau organischer Substanz vereinfacht, so stellt dieser die Umkehrung der Assimilation dar:



Hieraus wird in besonderem Maße die Bedeutung des Sauerstoffes als entscheidender Faktor bei der „biologischen Verbrennung“ deutlich.

Im Gegensatz hierzu zum Vergleich auch der Abbau unter anaeroben Bedingungen:



In dem Maße, wie O_2 abnimmt, reduziert sich der Abbau organischer Substanzen und die Gerüche nehmen zu.

Im Silo eingelagerte Hackschnittzel mit einem hohen Wassergehalt ($w > 50\%$), sowie einem hohen Nadel- und/oder Laubanteil (Landschaftspflegeholz), gehen nach kurzer Zeit in einen Kompostierungsprozess über.

Durch die z. B. beim Hacken im Wald aufgenommene Erde beschleunigt sich der Kompostierungsprozess zusätzlich. Es entstehen ähnliche Gerüche wie bei einer Kompostieranlage für Sträucher, Laub und Gras.

Geruchsemissionen beim Befüllen des Silos.

Der Befüllvorgang eines Silos mittels 40 m³ Container dauert zwischen 5 und 10 Minuten, einschließlich des Öffnens und Schließens des Silodeckels.

Bei Untersuchungen [SWL00] konnten außerhalb des Gefahrenbereiches des Containerfahrzeuges keine holztypischen Gerüche festgestellt werden. Diese werden durch die Abgase des Lieferfahrzeuges überlagert.

Maßnahmen zur Verminderung von Geruchsbelästigungen

Störende Auswirkungen auf die Umgebung können bei ausreichendem Abstand zur umliegenden Wohnbebauung vermieden werden. Zur Minderung von Geruchsbelästigungen in der Umgebung von Siloanlagen ist es auch möglich, die Zuluft für die Feuerung direkt aus dem Silo zu entnehmen. Der dadurch im Silo entstehende Unterdruck verhindert wirkungsvoll den Austritt der geruchsbeladenen Siloluft.

7.5 Sicherheitstechnische Anforderungen

Beim Bau und Betrieb von Siloanlagen sind umfangreiche sicherheitstechnische Anforderungen zu beachten. Folgende Bereiche sind dabei von besonderer Bedeutung:

- Maßnahmen zum Brandschutz.

Wie jede Brennstofflagerung stellt auch die Lagerung von Holzhackschnitzeln eine Erhöhung der Brandlast dar. Bei der Planung derartiger Anlagen ist dies besonders zu berücksichtigen, z. B. durch Einbau feuerbeständiger Wände, Decken und Feuerlöschanlagen. Zusätzlich sind Brandschutzmaßnahmen im Heizraum und im Bereich der Brennstoffbeschickung erforderlich.

- Absaugung der Gärgase im Silo.

- Maßnahmen zum Explosionsschutz.

Bezüglich der sicherheitstechnischen Anforderungen an Holzhackschnitzelsilos im Hinblick auf den Explosionsschutz muss grundsätzlich nach der Art des einzulagernden Brennstoffs unterschieden werden. Bei der Lagerung von Holzschnitzeln aus der Verarbeitung von getrocknetem Holz sind immer die Anforderungen des Explosionsschutzes zu berücksichtigen (Staubexplosionen). Bei der Lagerung von feuchten Holzhackschnitzeln (Feuchte > 25 % atro) aus Wald-, Landschaftspflege- und Sägerestholz sind derartige Schutzmaßnahmen dagegen nicht erforderlich.

- Maßnahmen zum Arbeitsschutz.

- Bauliche Maßnahmen:

Sicherungen zur Vermeidung von Absturzgefahren, Sicherungen gegen unbefugtes Öffnen des Silos, automatische Atemluftüberwachung (CO₂-Konzentration) im Silobereich sowie in den direkt benachbarten Arbeitsräumen, automatische Füllstandsanzeige usw.

- Organisatorische Maßnahmen:

Der Einstieg in das Silo ist nur unter Aufsicht einer zweiten Person und unter Seilschutz zu gestatten. Das Befüllen des Silos darf nur durch eingewiesenes Personal erfolgen usw..

Beim Bau und Betrieb von Siloanlagen sind insbesondere folgende Vorschriften und Regelwerke zu beachten:

- TRD (Technische Richtlinie Dampf) 414.
- Unfallverhütungsvorschrift BGV C12 „Silos“.
- Merkblätter für Silos für Holzstaub und –späne (ortsfeste Sprühwasser-Löschanlagen und Explosionsdruckentlastung) der Holz-BG.
- Merkblätter für den Brand- und Explosionsschutz in Holzbearbeitungsbetrieben, insbesondere für Feuerungsanlagen sowie Späne und Staubabsaugungsanlagen, der Württembergischen Gebäudebrandversicherungsanstalt.

8 Zusammensetzung und Entsorgung von Holzaschen bzw. Rückständen aus Rauchgaskondensationsanlagen

8.1 Einleitung

Bei der Verbrennung wird naturbelassenes Holz überwiegend in gasförmige Bestandteile umgewandelt. Nur ein geringer, vorwiegend mineralischer Anteil verbleibt als Asche zurück. Bei Holzfeuerungsanlagen wird zwischen Grobasche (Rostasche), Mittelasche (Zyklonflugasche) und Feinstflugasche unterschieden. In Abbildung 8-1 sind die bei der Holzfeuerung anfallenden Aschefraktionen schematisch dargestellt. Die angegebenen Gewichtsanteile am Gesamtascheanfall gelten für Rostfeuerungen mit Hackgut bzw. Rinde als Brennstoff [FNR00].

Grob- oder Rostasche fällt im Verbrennungsbereich der Feuerungsanlage, d. h. auf oder unter dem Rost bzw. in der Brennstoffmulde, an. Diese Aschefraktion enthält auch grobe mineralische Verschmutzungen und Eisenteile. Bei hohen Brennkammertemperaturen und/oder niedrigen Ascheerweichungstemperaturen kann die Grobasche auch gesintert oder geschmolzen als Schlacke anfallen.

Unter Mittel- oder Zyklonflugasche werden die Rückstände verstanden, die mittels Fliehkraftabscheider (Zyklone) aus dem Abgas entfernt werden. Hierzu gehören auch die Stäube, die sich im Bereich der Ausbrandzone oder des Wärmetauschers absetzen und bei Reinigungsvorgängen anfallen.

Die in den sekundären Entstaubungseinrichtungen (Elektro-, Gewebefilter) abgeschiedenen Flugstäube werden als Feinstflugasche oder Filterasche bezeichnet. Beim Einsatz von Kondensationsanlagen zur Rauchgasreinigung wird die Feinstflugasche im Kondensationschlamm gebunden.

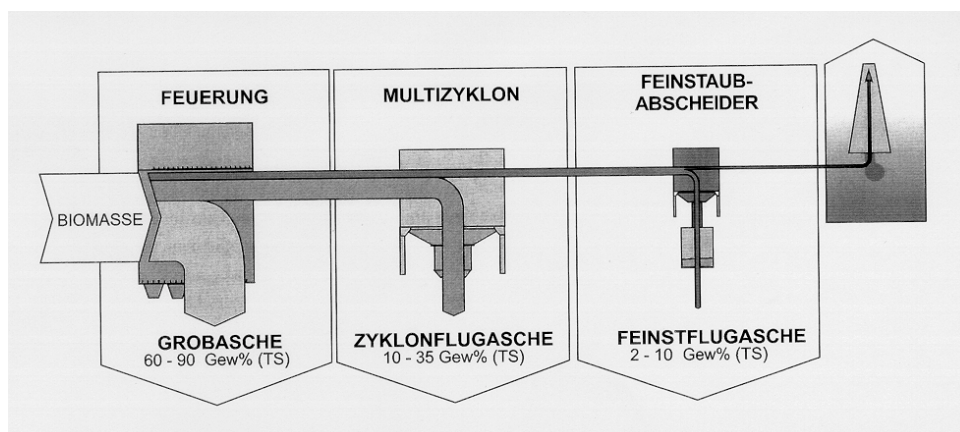


Abbildung 8-1: Schematische Darstellung der in einer Biomassefeuerung anfallenden Aschefraktionen [FNR00]

Die stoffliche Zusammensetzung der einzelnen Aschefractionen wird wesentlich durch den Brennstoff, den Ort der Abscheidung, die Abscheidebedingungen, den Ausbrand und die Feuerraumtemperatur beeinflusst.

Während der Verbrennung wird ein Teil der Aschepartikel von den Feuerungsgasen mitgerissen. Größere mineralische Brennstoffbestandteile verbleiben dagegen weitgehend im Rostbereich. Bei den hohen Temperaturen im Brennkammerbereich werden außerdem verschiedene Elemente bzw. Elementverbindungen in die Gasphase überführt. Elemente mit niedrigem Siedepunkt wie Arsen, Blei, Cadmium oder Zink verdampfen im Temperaturbereich zwischen 800 und 1.200 °C zu erheblichen Anteilen. Da die Temperaturen im Bereich des Abgasweges absinken, kondensieren die zuvor verdampften Elemente und werden in der Zyklonflugasche und mehr noch in der Feinstflugasche angereichert. Auch schwerflüchtige organische Schadstoffe, wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/PCDF) werden in diesen Aschefractionen aufkonzentriert. Elemente wie Aluminium, Chrom, Eisen, Mangan und Silicium verdampfen dagegen nur in sehr geringem Maße und verbleiben überwiegend, sofern sie nicht partikelförmig mitgerissen werden, in oxidischer Form in der Rostasche.

8.2 Zusammensetzung der Asche

Tabelle 8-1 enthält typische Werte für den Aschegehalt verschiedener naturbelassener Holzarten, Rinde, Hackgut mit Rinde und Hackgut ohne Rinde.

Holzart	Aschegehalt [Gew.-%]
Ahorn	1,30 - 1,35
Akazie	0,70 - 0,80
Birke	0,28 - 0,30
Buche	0,60 - 0,65
Tanne	2,00 - 2,20
Eiche	0,15 - 0,40
Fichte	2,20 - 2,70
Pappel	0,60 - 0,65
Rotholz	0,13 - 0,20
Rinde	5,00 - 8,00
Hackgut mit Rinde	1,00 - 2,50
Hackgut ohne Rinde	0,80 – 1,40

Tabelle 8-1: Aschegehalt von Hölzern und Holzbrennstoffen [Koz81, FNR00]

Tabelle 8-2 zeigt die Bandbreite der Elementgehalte der Grobaschen aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz:

Element		Gehalt
Ca	%	8,44 - 41,70
Fe	%	0,48 - 2,35
K	%	2,86 - 10,90
Mg	%	1,00 - 3,50
Mn	%	0,16 - 2,62
Na	%	0,06 - 0,97
P	%	0,67 - 3,52
Cl	ppm	33,00 - 4.510,00
F	ppm	1,00 - 350,00
As	ppm	< 1,00 - 35,00
Cd	ppm	< 1,00 - 20,00
Co	ppm	6,00 - 27,00
Cr	ppm	< 10,00 - 592,00
Cu	ppm	99,00 - 498,00
Ni	ppm	20,00 - 250,00
Pb	ppm	9,00 - 450,00
Zn	ppm	54,00 - 1.900,00

Tabelle 8-2: Zusammensetzung von Grobaschen aus naturbelassenem Holz [Pol95]

Die starke Streuung der Aschenzusammensetzung ist auf den unterschiedlichen Mineralstoffgehalt des Holzes (0,15 und 2,7 %) zurückzuführen.

Tabelle 8-3 zeigt die mittleren Nährstoffgehalte in den Aschefractionen von Rinden-, Hackgut-, und Spänefeuerungen. Diese sind vor allem im Falle der landwirtschaftlichen Verwertung von Interesse (siehe Abschnitt 8.4.2)

Verbindung	Grobasche		Zyklonflugasche		Feinstflugasche	
	[LWF99/1]	% [Obe95/1]	[LWF99/1]	% [Obe95/1]	[LWF99/1]	% [Obe95/1]
CaO	24,6	41,7	26,5	35,2	18,9	32,2
MgO	2,7	6,0	1,9	4,4	3,3	3,6
K ₂ O	6,6	6,4	4,5	6,8	11,6	14,3
P ₂ O ₅	2,7	2,6	1,9	2,5	1,6	2,8
Na ₂ O		0,7		0,6		0,8

Tabelle 8-3: Durchschnittliche Nährstoffgehalte in den Aschefractionen von Rinden-, Hackgut-, und Spänefeuerungen (aus 2 Literaturstellen).

In Tabelle 8-4 sind durchschnittliche Schwermetallgehalte sowie der Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) in den Aschefractionen von Rinden-, Hackgut-, und Spänefeuerungen aus naturbelassenem Holz dargestellt. Dabei sind die höheren Gehalte in [Obe95/1] nach Mitteilung des Autors vor allem auf das analytische Aufschlussverfahren zurückzuführen. Tabelle

8-5 zeigt die Konzentrationen an organischen Schadstoffen und Chlorid sowie den Gehalt an organischem Kohlenstoff in Aschefractionen aus Hackgut-, und Spänefeuerungen.

Element	Grobasche		Zyklonflugasche		Feinstflugasche	
	[LWF99/1] (ppm)	[Obe95/1] (ppm)	[LWF99/1] (ppm)	[Obe95/1] (ppm)	[LWF99/1] (ppm)	[Obe95/1] (ppm)
As	2,6	4,1	11	6,7	27	37,4
Cd	1	1,2	19	21,6	28	80,7
Co	10	21	14	19	13	17,5
Cr	35	325,5	151	158,4	152	231,3
Cu	119	164,6	120	143,1	220	389,2
Hg	< 0,1	0,01	0,2	0,04	0,5	1,47
Mo	1,9	2,8	7	4,2	7,5	13,2
Ni	33	66	31	59,6	45	63,4
Pb	15	13,6	121	57,6	845	1053,3
V	13	43	9,7	40,5	24	23,6
Zn	309	432,5	1290	1870,4	6480	12980,7
TOC	2		9		11	

Tabelle 8-4: Schwermetallgehalte sowie der Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) in den Aschefractionen von Rinden-, Hackgut-, und Spänefeuerungen mit naturbelassenem Fichtenholz.

Schadstoff	Grobasche	Zyklonflugasche	Einheit
C _{org}	0,2 – 1,9	0,3 – 3,1	Gew.-% TS
Cl	< 0,01	0,1 – 0,5	Gew.-% TS
PCDD/PCDF	2,4 – 33,5	16,3 – 23,3	ng TE / kg TS
PAK	1,3 – 1,7	27,6 – 61,0	mg / kg TS

Tabelle 8-5: Konzentrationen an ausgewählten organischen Schadstoffen und Chlorid sowie der Gehalt an organischem Kohlenstoff in Aschefractionen aus Hackgut- und Spänefeuerungen mit naturbelassenem Holz [FNR00].

Aus Tabelle 8-4 ist zu erkennen, dass Flugaschen in der Regel höher mit leichter flüchtigen Schwermetallen belastet sind als Grobaschen. Dies gilt auch für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) (siehe Tabelle 8-5).

Bei der Entscheidung über die Verwertung bzw. Beseitigung der Asche kommt dem Eluierverhalten (Auswaschungsverhalten) eine wichtige Bedeutung zu, da die für Holzfeuerungen typischen feinkörnigen Aschen zu 10 bis 30 % aus wasserlöslichen Verbindungen bestehen. Hierbei handelt es sich vornehmlich um hydroxidische und carbonatische Alkali- und Erdalkaliverbindungen. Dementsprechend weist die Asche einen hohen pH-Wert auf. Werte zwischen pH 11 und pH 13 sind bei Holzaschen typisch. Die Alkalität bewirkt eine Fixierung der meisten Schwermetalle in der Asche und begrenzt somit die Elution von Schadstoffen. Ande-

rerseits fällt die Asche bei Holzfeuerungen in der Regel in feinkörniger Form an, da die Brennkammertemperatur kaum über 1.200 °C ansteigt. Die Asche weist damit eine große Oberfläche auf, was wiederum die Elution von Schwermetallen begünstigt.

Das Auswaschungsverhalten der verschiedenen Inhaltsstoffe (Nährstoffe, Schadstoffe) wird durch das Elutionsverfahren nach DIN 38414 bestimmt. Dabei werden 100 g Asche in 1.000 ml destilliertem Wasser suspendiert und 24 Stunden geschüttelt. Im Filtrat wird dann der in Lösung gegangene Anteil an relevanten Elementen und Verbindungen bestimmt [Mar99].

In Tabelle 8-6 ist das Eluatverhalten einzelner Aschefraktionen aufgelistet [LWF99/1]. Besondere Beachtung ist auf den Chrom(VI)-Wert zu legen, der in der Grobasche auch über 0,1 mg/l liegen kann.

Element	Eluatgehalte in mg/l		
	Grobasche	Zyklonflugasche	Feinstflugasche
As	< 0,007	< 0,001	0,01
Ba	0,23	0,22	0,28
Cd	< 0,01	< 0,05	< 0,21
Co	< 0,01	0,1	< 0,1
Cr (VI)	< 0,05	0,34	0,9
Cu	< 0,008	< 0,13	< 0,13
Mg	< 0,0001	< 0,0002	< 0,0002
Mo	< 0,1	< 0,12	< 0,28
Ni	< 0,01	< 0,1	< 0,13
Pb	< 0,05	< 0,1	1,8
Sb	0,004	< 0,05	< 0,02
Zn	< 0,08	0,7	2,7

Tabelle 8-6: Eluatverhalten von Schwermetallen in den einzelnen Aschefraktionen von naturbelassenem Holz [LWF99/1]

8.3 Zusammensetzung des Kondensatschlammes

In Kondensationsanlagen zur Rauchgasreinigung findet während der Kontaktzeit zwischen Asche, Rauchgas und Wasser entsprechend der Löslichkeit der einzelnen in der Flugasche enthaltenen Verbindungen eine teilweise Auflösung des Feststoffanteils und eine Absorption gasförmiger Komponenten im Kondensat statt. Der nicht in Lösung gehende Anteil der Flugasche fällt gemeinsam mit dem Kondensat als Schlamm aus.

Bisher liegen nur wenige Messungen über die Qualität von Kondensatschlämmen vor. Testmessungen in Österreich an drei Biomassefeuerungen mit Vorschubrostfeuerung, Multizy-

klon und nachgeschalteter Rauchgaskondensation [Obe98] mit Rinde als Brennstoff ergaben einen Schlammanfall zwischen 0,01 und 0,3 kg Trockensubstanz (TS) je MWh vom Kessel erzeugter Energie. Die Untersuchungen an den genannten Anlagen sind in Tabelle 8-7 aufgelistet. Es fällt auf, dass die Schwermetallgesamtgehalte deutlich über denen der Aschen liegen.

Parameter	Einheit	Durchschnittliche Konzentration
S	mg/kg TS	570 - 16.500
Cl	mg/kg TS	65 - 660
Si	mg/kg TS	17.500 - 40.000
Ca	mg/kg TS	230.000 - 320.000
Mg	mg/kg TS	16.500 - 32.700
K	mg/kg TS	7.000 - 14.000
Na	mg/kg TS	600 - 1.550
P	mg/kg TS	10.500 - 27.000
Al	mg/kg TS	9.250 - 14.000
Fe	mg/kg TS	15.100 - 54.800
Mn	mg/kg TS	13.800 - 32.000
Cu	mg/kg TS	300 - 880
Zn	mg/kg TS	10.800 - 30.800
Co	mg/kg TS	15 - 35
Ni	mg/kg TS	50 - 200
Pb	mg/kg TS	275 - 1.360
Cd	mg/kg TS	35 - 155
V	mg/kg TS	27,5 - 425
Hg	mg/kg TS	6,8 - 51
Ba	mg/kg TS	2.150 - 4.200

Tabelle 8-7: Zusammensetzung des Kondensatschlammes nach [Obe98].

8.4 Verwertung und Beseitigung von Holzaschen

8.4.1 Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht

Aschen und Filterstäube sind Abfälle im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrWG/AbfG). Soweit Abfälle nicht vermieden werden können, sind sie nach Möglichkeit stofflich oder energetisch zu verwerten. Der Vorrang der Verwertung entfällt, wenn die Beseitigung die umweltverträglichere Lösung darstellt. Auch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) enthält für nicht vermeidbare Abfälle in § 5 unter Hinweis auf die Regelungen des KrW-/AbfG den Vorrang der Verwertung vor der Beseitigung.

Im Hinblick auf die Entsorgung ist zu beachten, dass die in der Feuerungsanlage anfallenden Grobaschen, Zyklonflugaschen und Feinstflugaschen nicht vermischt werden dürfen, wenn dadurch ihre Verwertbarkeit eingeschränkt oder verhindert wird.

Holzasche aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz ist gemäß dem Europäischen Abfallkatalog (EAK) dem Abfallschlüssel "1001 01, Rost- und Kesselasche" in der EAK-Gruppe "Abfälle aus Kraftwerken und anderen Verbrennungsanlagen" zuzuordnen. Abfälle, die diesem Abfallschlüssel zugeordnet sind, gelten als nicht besonders überwachungsbedürftig im Sinne von § 41 des KrW/AbfG. Holzaschen können auf einer Hausmülldeponie entsorgt werden, wenn die Zuordnungswerte des Anhangs 2 der Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) eingehalten werden.

Die AbfAbIV definiert 2 Deponieklassen:

Deponieklasse I (Inertstoffdeponie)

Auf dieser Deponie können Abfälle abgelagert werden, die einen sehr geringen organischen Anteil aufweisen und die im Auslaugversuch nach DIN 38 414 DEV S4 eine niedrige Schadstofffreisetzung zeigen. (Tabelle 8-8, linke Spalte).

Deponieklasse II

Für diesen Deponietyp gelten wegen der höheren Anforderungen an deren Ausstattung und Sicherheitseinrichtungen etwas weniger strenge Anforderungen an die Beschaffenheit der abzulagernden Abfälle (Tabelle 8-8, mittlere Spalte).

Werden die Kriterien nach der AbfAbIV nicht eingehalten, ist die Asche auf eine Sonderabfalldeponie entsprechend der TA Abfall zu verbringen. Auf Sonderabfalldeponien entsprechend TA Abfall werden höhere Schadstoffgehalte in den abzulagernden Abfällen zugelassen (Tabelle 8-8, rechte Spalte), da hier die Anforderungen an den Deponiestandort und das Abdichtungssystem sehr hoch sind.

Parameter		DK I	DK II	TA Abfall, Teil 1
Festigkeit				
Flügelscherfestigkeit	KN/m ²	≥25	≥25	≥25
Axiale Verformung	%	≤20	≤20	≤20
Einaxiale Druckfestigkeit	KN/m ²	≥50	≥50	≤50
Org.Anteil des Trockenrückstandes d. Originalsubstanz				
Bestimmt als Glühverlust	Masse-%	≤3	≤5	≤10 Gew.-%
Bestimmt als TOC	Masse-%	≤1	≤3	-
Extrahierbare lipophile Stoffe	Masse-%	≤0,4	≤0,8	≤4 Gew.-%
Eluatkriterien				
pH-Wert		5,5-13	5,5-13	4-13

Leitfähigkeit	µS/cm	≤10 000	≤50 000	≤100 000
TOC	mg/l	≤20	≤100	≤200
Phenole	mg/l	≤0,2	≤50	≤100
Arsen	mg/l	≤0,2	≤0,5	≤1
Blei	mg/l	≤0,2	≤1	≤3
Cadmium	mg/l	≤0,05	≤0,1	≤0,5
Chrom-VI	mg/l	≤0,05	≤0,1	≤0,5
Kupfer	mg/l	≤1	≤5	≤10
Nickel	mg/l	≤0,2	≤1	≤2
Quecksilber	mg/l	≤0,005	≤0,02	≤0,1
Zink	mg/l	≤2	≤5	≤10
Fluorid	mg/l	≤5	≤25	≤50
Ammonium-N	mg/l	≤4	≤200	≤1000 (NH ₄)
Chlorid	mg/l	-	-	≤10000
Cyanide	mg/l	≤0,1	≤0,5	≤1
Sulfat	mg/l	-	-	≤5000
Nitrit	mg/l	-	-	≤30
AOX	mg/l	≤0,3	≤1,5	≤3
Abdampfungsrückstand	Masse-%	≤3	≤6	≤10 Gew.-%

Tabelle 8-8: Zuordnungswerte für die Ablagerung von Abfällen nach Anhang 2 der AbfAbIV und Anhang D der TA Abfall

Die TA Abfall und die AbfAbIV sehen zudem vor, dass Monodeponien oder entsprechende gesonderte Bereiche, sogenannte Monoabschnitte, eingerichtet werden können. Dabei dürfen einzelne Schadstoffgehalte des Anhangs B der Technischen Anleitung überschritten werden. Ausgenommen hiervon sind jedoch die Parameter für die Festigkeit und für den organischen Anteil. Als abzulagernde Abfälle kommen solche in Frage, die in großen Mengen anfallen - was bei Holzfeuerungen kaum der Fall ist - und bei gemeinsamer Ablagerung ein gleiches Reaktionsverhalten zeigen.

Problematisch in Bezug auf die Zuordnungswerte für die Ablagerung von Holzaschen sind insbesondere der Glühverlust und der Eluatwert für Chrom VI. Hierbei sind folgende Werte einzuhalten:

Glühverlust:

Deponieklasse I: ≤ 3 Masse-%

Deponieklasse II: ≤ 5 Masse-%

Eluatwert für Chrom VI:

Deponieklasse I: ≤ 0,05 mg/l

Deponieklasse II: $\leq 0,1 \text{ mg/l}$

Pflanzenaschen weisen auf Grund der darin enthaltenen unverbrannten organischen Bestandteile häufig einen Glühverlust über 5 Masse-% auf. Bei Holzaschen, selbst aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz, kann zudem der zulässige Chrom VI- Eluatwert überschritten sein. In diesem Fall müsste die Asche auf einer Sonderabfalldeponie entsorgt werden, wobei die Entsorgung von Kleinmengen zusammen mit Hausmüll auf Hausmülldeponien (Deponieklasse II) unproblematisch erscheint. Es wurden auch schon Untersuchungen über die Behandlung der Aschen zur Schadstoffreduzierung durchgeführt.

8.4.2 Verwertung in der Landwirtschaft und im Forst

Bei der land- und forstwirtschaftlichen Verwertung von Holzaschen hat die Sicherung des Schutzgutes Boden und die Erhaltung seiner Nutzbarkeit Priorität.

Kriterien für den Einsatz von Aschen als Düngemittel sind hoher Nährstoffgehalt und geringe Gehalte an schädlichen Schwermetallen.

Nährstoffe sind die oxidischen Calcium-, Kalium-, Magnesium- und Phosphorverbindungen. Eine Tonne reine Holzasche enthält an Pflanzennährstoffen im Durchschnitt 350 bis 450 kg Calciumoxid, jeweils 40 bis 60 kg Kalium- und Magnesiumoxid sowie 20 bis 35 kg Phosphoroxid. Kalium ist sehr gut pflanzenverfügbar, Phosphat nur in geringem Maße. Calcium und Magnesium nehmen eine Mittelstellung ein. Außerdem ist die Asche alkalisch und kann so zur Neutralisation übersäuerter Böden beitragen. Als günstig wird auch der fehlende Gehalt an Stickstoffverbindungen angesehen, da die meisten Böden eher einen Überschuss als einen Mangel an Stickstoff aufweisen.

Dem gegenüber stehen die Schadstoffgehalte in den Aschen (vgl. Tabellen 8-4 und 8-5). Für eine Verwertung kommen allenfalls reine Rostaschen, die nicht mit anderen Aschefractionen vermischt sein dürfen, in Betracht. Flug- und Zyklonaschen sind wegen ihrer erheblichen Schwermetallgehalte in jedem Fall für eine Verwertung ungeeignet. Das gilt auch für Rostaschen mit erhöhten Gehalten an leicht eluierbarem Chrom (VI).

Eine besondere Regelung für die Verwertung von Aschen auf Böden besteht derzeit nicht; auch eine Zulassung als Düngemittel nach Düngemittelrecht liegt nicht vor. Der wissenschaftliche Beirat Düngung berät jedoch zur Zeit über einen Düngemitteltyp für Holzaschen. Solange keine entsprechende Zulassung vorliegt, sind daher bei der land- und forstwirtschaftlichen Verwertung von Aschen die Bestimmungen des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) anzuwenden.

Dies bedeutet, dass entsprechend §12 BBodSchV bei der Ausbringung von Materialien auf Böden i.d.R. die Vorsorgewerte für Böden auch als Bewertungsmaßstab für die Materialien heranzuziehen sind. In den meisten Fällen scheidet damit eine landwirtschaftliche Verwertung aus. Darüber hinaus ist nach §12 Abs. 8 BBodSchV eine Aufbringung auf Böden unter Wald i.d.R. gänzlich ausgeschlossen.

8.4.3 Zuschlagstoffe für mineralische Baustoffe

Holzaschen können wie Steinkohleflugaschen als Zuschlagstoffe für mineralische Baustoffe genutzt werden. Je nach Zusammensetzung der Aschen können etwa 10 bis 20 % Asche den Zementwerkstoffen beigefügt werden, ohne dass die Festigkeitswerte des Zements nennenswert vermindert werden [Mar99].

Geringe Schwermetallfrachten sind von nachgeordneter Bedeutung, da sie in der Regel normale Bestandteile des Zementklinkers sind und durch chemische Umsetzung mit den alkalischen und silikatischen Zementbestandteilen wirkungsvoll immobilisiert werden. Dennoch dürfte auch bei diesem Verwertungsweg der geringe Ascheanfall der meisten Feuerungsanlagen eine Nutzung einschränken.

9 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Die WärmeGESTEHUNGSKOSTEN moderner Holzhackschnitzelheizanlagen mit Feuerungswärmeleistungen < 1 MW liegen heute je nach der Höhe der Brennstoffkosten zwischen 0,04 und 0,20 DM/kWh [BMU99, UBA00, BUC00, FNR00, SWL00].

Nachfolgend ist die Ermittlung der WärmeGESTEHUNGSKOSTEN an einem konkreten Projekt beispielhaft dargestellt [SWL00].

Projektbeschreibung:

Feuerungsart:

Unterschubfeuerung, mit einer Nennwärmeleistung von 650 kW. Als Jahresenergieertrag wurden bei der Kalkulation 1049 MWh angesetzt.

Wärmeabnehmer:

Fernwärmenetz mit Wohngebäuden, Schulzentrum, Mehrzweckhalle und Gemeindezentrum.

Emissionsseitige Anforderungen:

Staubemission < 150 mg/m³

Silo:

Es wurde ein Silo mit ca. 200 m³ Fassungsvermögen errichtet. Dabei wird die natürliche Geländeform als Zufahrt genutzt.

Heizraum:

Der Heizraum wurde auf der gleichen Ebene angebaut wie das Silo. Die WärmeERZEUGUNG erfolgt mit Hilfe eines Hackschnitzelkessels, die Notversorgung wird durch einen Ölkessel gewährleistet.

Wärmeverteilung:

Die Wärmeverteilung erfolgt über eine witterungsgesteuerte Pumpenregelung, bei konstanter Netzvorlauftemperatur von 85 °C.

Baumaßnahmen im Schulgebäude

- Ausbau der beiden Heizkessel
- Renovierung des Verteilers
- Einbau der Übergabestation

Anschluss des Gemeindezentrums

Die Wärmeversorgungsleitung zum Gemeindezentrum wurde im Zuge des Rathausneubaus in dieses Gebiet verlegt.

Brennstoffeinsatz

Es werden sowohl Waldholzhackschnitzel (Bezugspreis 25,- bis 35,- DM/Srm) als auch Hackschnitzel aus Sägewerksrestholz (Bezugspreis 10,- bis 15,- DM/Srm) eingesetzt.

Kostenermittlung bei Abgasreinigung mittels Zyklonabscheider

Investitionskosten Wärmeversorgung

Fernwärmesystem:

Wärmenetz, Haupt- und Abzweigstränge		
Neubaugebiet und Schule	DM	377.500
Gemeindezentrum	DM	102.500
Hausanschluss	DM	40.000
	<hr/>	
	DM	530.000
Heizzentrale:		
Gebäude Heizzentrale, Silo und Heizraum		
Kamin, etc.	DM	155.000
Hackschnitzelkessel mit Siloaustragung		
einschl. Steuerung und Montage	DM	285.000
	<hr/>	
	DM	440.000
Übergabestation:		
Planung:		
	DM	170.000
	DM	180.000
<hr/>		
Investitionssumme	DM	1.320.000

Betriebskosten

Ausgaben	DM/a
Hackschnitzel	32284
Abrechnung der Wärmekosten mit den Kunden	10000
Wartung	10000
Rücklagen	11194
Strom Kessel	3360
Strom Pumpe	1680
Netzverlust	5379
Summe	73897

Die Betriebskosten für den Zyklonabscheider sind vernachlässigbar.

Wirtschaftlichkeit

Die Gesamtkosten pro Jahr setzen sich aus den Betriebskosten plus den Kapitalkosten (Zins, Abschreibung usw.) für die Investitionen zusammen.

Summe Gesamtkosten 175.000 DM/a

Summe Verbrauch 1153 MWh/a

Gemittelte Vollkosten 0,15 DM/kWh

Zu diesen Preisen ist die gesetzliche Mehrwertsteuer hinzuzurechnen [SWL00].

Zusatzkosten bei Einbau hochwirksamer Luftreinhaltechnik

Abhängig von den Anforderungen an den Reststaubgehalt im Rauchgas von Holzhackschnitzelfeuerungsanlagen werden heute unterschiedliche Entstaubungstechniken eingesetzt (siehe Abschnitt 6 „Luftreinhaltechnik“). Die kostengünstigsten Entstaubungssysteme stellen dabei Fliehkraftabscheider (Multizyklone) dar. Auf Grund des vergleichsweise hohen

Reststaubgehaltes können derartige Systeme jedoch bei erhöhten Anforderungen an die Luftreinhaltung (Reststaubgehalte im Rauchgas < 100 mg/m³) nur als Vorabscheider verwendet werden. Als Feinabscheider sind hier Elektrofilter, Gewebefilter oder Rauchgaskondensationsanlagen besonders geeignet. Für Feuerungsanlagen mit Feuerungswärmeleistungen im Bereich um 1 MW werden die durch den Einsatz hochwirksamer Filtertechnik entstehenden Mehrkosten von Fachleuten derzeit mit 12 bis 40 % - bezogen auf die Wärmegestehungskosten - angegeben. In Tabelle 9-1 sind die in verschiedenen Quellen genannten prozentualen Mehrkosten beim Einsatz von Elektrofiltern, Gewebefiltern und Kondensationsanlagen zusammengestellt.

Feinabscheider	Quelle	Mehrkosten	Erreichbare Reststaubgehalte
Elektrofilter	[SWL00]	17 – 22 %	< 50 mg/m ³
	[Nuss00]	12 – 20 %	
	[HEF00]	20 – 40 % *)	
Gewebefilter	[SWL00]	12 – 16 %	< 10 mg/m ³
	[Nuss00]	17 – 30 %	
	[HEF00]	20 – 25 % *)	
Rauchgaskondensation	[SWL00]	ca. 30 %	< 50 mg/m ³
	[Nuss00]	15 – 17 %	
	[HEF00]	ca. 30 %	

*) Wärmegestehungskosten ab Heizzentrale

Tabelle 9-1: Prozentuale Mehrkosten beim Einsatz von Elektrofiltern, Gewebefiltern und Kondensationsanlagen [SWL00, Nuss00, HEF00]

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Holzhackschnitzelheizanlagen auch bei Anwendung effektiver Abgasreinigungstechnik im Falle richtiger Dimensionierung und guter Auslastung bereits heute an der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit stehen oder diese bereits überschritten haben.

10 Literaturverzeichnis

- [Bau93] Baumbach et al.: *Luftverunreinigungen aus gewerblichen und industriellen Biomasse- und Holzfeuerungen*, ecomed, Landsberg, 1997
- [Bau97] Baumbach, Zuberbühler, Siegle, Hein: *Luftverunreinigungen aus gewerblichen und industriellen Biomasse- und Holzfeuerungen*, ecomed Verlagsgesellschaft Landsberg, 1997
- [Ber99] Berger, R.: *Einfluß der Brennstofffeuchtigkeit auf die Verbrennung in Rostfeuerungen*, Beitrag zum Kolloquium „Mit moderner Feuerungstechnik zur rauchfreien Holzverbrennung“ am 21. September 1999 in Stuttgart, Bericht Nr. 43 – 1999 des IVD der Universität Stuttgart, 1999
- [BIZ00] Biomasse Info- Zentrum, <http://www.biomasse-info/index2.htm>, 2000
- [BLFU] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, *Emissionen von Holzfeuerungsanlagen*, 1994, <http://www.bayern.de/LfU/luft/holzfeuer/>
- [BMU99] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktortechnik, „*Erneuerbare Energien und Nachhaltige Entwicklung*“, Juli 1999
- [Boc95] Bockelmann, C., Marutzky, R., Pohlandt, K.: *Konzentrationen ausgewählter Elemente in Holzsortimenten*, Berichte des Wilhelm Klauditz Instituts, 1995
- [BUC00] Matthias Buchser: *Leitfaden für die Errichtung von Holzenergie-Anlagen, Umsetzung – Wirtschaftlichkeit – Technologie*, EFO Energie Forum GmbH Bonn 2000
- [Cen95] Center für Biomasse-Technologie, *Holz als Energieträger – Technik, Umwelt und Ökonomie*, Aarhus, 1995
- [DFIU99] Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung Universität Karlsruhe, *Luftverunreinigungen aus gewerblichen und industriellen Holz- und Biomassefeuerungsanlagen – Stand der Abgasreinigung*, 1999
- [FNR00] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., *Leitfaden Bioenergie*, 2000
- [For98] Forstabsatzfonds (Hrsg.): *Holzenergie für Kommunen – Ein Leitfaden für Initiatoren*, Bonn, 1998
- [Har97] Hartmann, H. und Madeker, U.: *Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen – Anbieter, Absatzmengen, Qualitäten, Service, Preise*, Landtechnik Bericht Nr. 28, Selbstverlag Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.) Freising, 1997
- [HEF00] Holzenergie-Fachverband Baden-Württemberg: *Statement zum Fachgespräch über Nutzen und Kosten von Holzfeuerungsanlagen am 19.05.2000 im Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg* (unveröffentlicht)
- [Hof96] Hoffmann, V.: *Zuordnungskriterien für Rest- und Altholz zur energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung*. In R. Marutzky und W. Schmidt (Hrsg.): *Alt- und Restholz: Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik*, S.185-189. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996

- [IVD98] *Kurzbeschreibung des am IVD eingesetzten Verfahrens zur Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens.* Heinzl; interner Bericht; Stuttgart, 15.4.1998
- [IVD98/1] Universität Stuttgart IVD: Emissionsarme Holzverbrennung in häuslichen und gewerblichen Feuerungsanlagen, Kolloquium 1998
- [IVD99] Universität Stuttgart IVD / UMEG, Feinstaubuntersuchung an Holzfeuerungen, UMEG-Bericht Nr. 44 - 1999, ISBN 3-928123-38-6
- [IVD99/1] Weese U.: *Anforderungen an moderne Holzfeuerungen*, IVD-Bericht Nr. 43 – 1999,
- [Kal97] Kaltschmitt, Martin: *Nachwachsende Rohstoffe*, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 1997
- [Koz81] Karl J.Thome-Kozmiensky: *Energiegewinnung durch emissionsarme Verbrennung von Rückständen in Kleinanlagen.* E. Freitag-Verlag für Umwelttechnik, Berlin 1981
- [LAG98] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: *Anforderung an die Entsorgung von Holzabfällen, Teil1: Zuordnung von Holzabfällen*, Entwurf nach mündlicher Erörterung, 12.01.1998
- [Leit98] *Holzenergie für Kommunen, Ein Leitfaden für Initiatoren*, Absatzförderungsfonds der deutschen Forstwirtschaft, Godesberger Allee 142-148, Bonn, 1998
- [LfU89] Dr. Kamm, Röhm, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: *Der „lebende Zyklon“ als Trockensorptions-Reaktor*, Zeitschrift WLB Wasser Luft und Boden 12-1989
- [LWF99] Bayerisches Landesamt für Wald und Forstwirtschaft: *Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln*, LWF-Bericht Nr. 21, 1999
- [LWF99/1] Bayerisches Landesamt für Wald und Forstwirtschaft. F u E-Projekt *Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe* - Merkblatt April 1999-
- [LWV96] *Biomasse als Festbrennstoff*, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Nr. 6. Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e. V. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster 1996
- [Mar97] Marutzky, R. (Hrsg.): *Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen*, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [Mar98] Marutzky, R., Strecker, M.: *Anforderungen an Holzbrennstoffe und Aschen*, Beitrag zum Kolloquium „Emissionsarme Holzverbrennung in häuslichen und gewerblichen Feuerungsanlagen“ am 29. September 1998 in Stuttgart, Bericht Nr. 41 – 1998 des IVD der Universität Stuttgart, 1998
- [Mar99] Marutzky, R., Seeger, K.: *Energie aus Holz und anderen Biomassen*, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfeld-Echterdingen, 1999
- [MLR99] Ministerium für Ländlichen Raum (Hrsg.): *SchwörerHaus – Mitverbrennung externer Biomassen in einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage*, Fichtner Studie Nr. 6390P01-000/11442 494/9014, 1999

- [Mue93] Muellerbuchhof, G.: *Lagertrocknung von Holz-Hackschnitzeln*. Institut für Energieversorgung, Ingenieurbetrieb der Vereinigten Energiewerke AG, Dresden, 1993
- [Nus00] Prof. Dr. Thomas Nussbaumer, Ingenieurbüro für Verfahrens- Energie- & Umwelttechnik, Langmauerstr. 109, Zürich, 2000 – nicht veröffentlicht -
- [Obe95] Obernberger, Ingwald, persönlich Mitteilung in [Kal97], Institut für Verfahrenstechnik, TU Graz, November 1995
- [Obe95/1] Obernberger, Ingwald: *Aschenbehandlung und Ascheverwertung bei Frisch- und Restholzaschen*. VDI-Seminar Salzburg 1995
- [Obe97] Obernberger, Ingwald: *Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente*, Schriftenreihe "Thermische Biomassenutzung", Band 1, ISBN 3-7041-0241-5, dbv-Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Österreich, 1997
- [Obe98] Obernberger, Ingwald: *Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen*. Schriftenreihe. Thermische Biomassenutzung. dbv-Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Österreich, 1998.
- [Pol91] Poletschny, H. et al.: *Untersuchung von Kompostausgangsmaterialien und Komposten zur Standardisierung von Grün- und Biokomposten im Hinblick auf ihre unbedenkliche Verwertung in Landwirtschaft und Gartenbau*, Untersuchungsbericht der LFUA Bonn, 1991
- [Pol95] Polandt, K.: *Zusammensetzung, Verwertung und Entsorgung von Holzaschen*. Holz-Zentralblatt 121 (1995), S.1305
- [Pra94] Prankl, H., Weingartmann, H.: *Hackgutttrocknung Wippenham*, Forschungsberichte der Bundesanstalt für Landtechnik. Wieselburg, Österreich, 1994
- [Rös96] Rösch, Christine: *Vergleich stofflicher und energetischer Wege zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen – unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in Baden-Württemberg*, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 5857, 1996
- [See89] Seeger Klaus: *Energietechnik in der Holzverarbeitung*, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 1989
- [Sto98] Stockinger, H.; Obernberger, I.: *Langzeitlagerung von Rinde. Bericht zu Lagerversuchen von Rinde bei unterschiedlichen Randbedingungen*, Teilbericht zum FWF-Forschungsprojekt P10669-ÖTE, Life-Cycle Analyse für Bioenergie, Institut für Verfahrenstechnik, Arbeitsgruppe Thermische Biomassenutzung, TU Graz, Österreich, 1998
- [SWL00] SWL „Wärme aus der Natur“, Bau- und Betriebsgesellschaft für Holzheizungen mit Wärmeverbund mbH, 79872 Bernau, 2000 – nicht veröffentlicht -
- [Tab93] Tabasaran, O. und Shiler, A.: *Analyseübersicht von Komposten und deren Ausgangsmaterialien unterschiedlicher Herkunft und Standorte*, Verbundvorhaben des BMFT „Neue Techniken zur Kompostierung“, Teilvorhaben 5, Universität

Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, 1993

- [UBA00] Umweltbundesamt, Berichte „Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien“ Erich Schmidt Verlag Berlin, 2000
- [VDI] VDI 3462, Bl. 4, Beuth-Verlag Berlin
- [VüK97] Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Kleinf Feuerungsanlagen – 1. BImSchV), 1996

11 Glossar

Die Begriffsdefinitionen und –erläuterungen wurden, soweit nicht anders angegeben, [BIZ00] entnommen.

Asche:

Bei der restlosen Verbrennung (Veraschen) von organischen Substanzen zurückbleibende anorganische Bestandteile. Es handelt sich hierbei um ein Gemisch von Carbonaten, Sulfaten, Phosphaten, Chloriden und Silicaten der Alkali- und Erdalkalimetalle sowie Eisenoxiden und dergleichen.

Ascheerweichungspunkt:

Erste Anzeichen des Erweichens der Asche bei hohen Temperaturen (Oberflächenveränderungen, Rundwerden der Kanten, Schrumpfen).

Aschegehalt:

Ist die Menge an Verbrennungsrückständen, die beim Glühen des Brennstoffes unter festgesetzten Bedingungen entsteht, zumeist angegeben in Gewichts-Prozent. Bei vollständiger Verbrennung von Holz bleiben je 100 kg Brennstoff zwischen 0,2 und 0,6 kg Asche zurück.

Atro:

Abkürzung für "absolut trocken". Biomasse in absolut trockenem (d. h. wasserfreiem) Zustand kann nur durch künstliche Trocknung erreicht werden. Synonym wird auch der Begriff "wasserfrei" (wf) verwendet.

Bioenergie:

Sammelbegriff für Energieformen, die aus unterschiedlichen Arten von festen, flüssigen oder gasförmigen Biomassen gewonnen werden.

Biomasse:

Gesamtheit der durch Pflanzen und Tiere erzeugten organischen Substanz.

Brennwert H_o (früher oberer Heizwert):

Als Brennwert (Symbol H_o) wird der Quotient aus der bei vollständiger Verbrennung einer bestimmten Brennstoffmenge freiwerdenden fühlbaren Wärmemenge und der Masse dieser Brennstoffmenge bezeichnet, wenn das bei der Verbrennung gebildete Wasser flüssig vorliegt und wenn die Temperatur des Brennstoffes vor der Verbrennung und die Temperatur der entstandenen Produkte nach der Verbrennung den jeweils festgelegten gleichen Wert hat.

Emissionen:

Emissionen nennt man alle Absonderungen, die von festen oder beweglichen Anlagen (Ma-

schinen, Kraftwerken, Autos) oder Stoffen (Abfall, Chemikalien usw.) in Form von Gas, Staub, Geräuschen, Strahlen, Wärme und Erschütterungen an die Umgebung (Umwelt) abgegeben werden.

Energie:

Energie kommt in der Natur in verschiedenen Formen vor. Energie kann man nicht herstellen oder vernichten, sondern nur von einer Form in eine andere umwandeln. So wird z. B. bei der Stromgewinnung aus Biomasse chemisch gebundene Sonnenenergie zuerst in Wärmeenergie, dann in mechanische Bewegungsenergie und schließlich in elektrische Energie überführt. Die Einheiten der Energie sind im internationalen Einheitensystem sind Joule, Wattsekunde, Elektronenvolt u. Newtonmeter.

Energieträger:

Stoffe oder physikalische Erscheinungen, in denen Energie gespeichert ist.

Erneuerbare Energien:

Erneuerbare Energien sind Energieträger, die "unendlich" lange zur Verfügung stehen, im Unterschied zu den fossilen Energieträgern (wie Kohle, Erdöl, Erdgas oder spaltbare Elemente), die an begrenzte Stoffvorräte gebunden sind.

Feuerungsanlage:

Anlage, bei der durch Verfeuerung von Brennstoffen Wärme erzeugt wird; zur Feuerungsanlage gehören Feuerstätte und, soweit vorhanden, Verbindungsstück und Abgaseinrichtung [VüK97].

Feuerungswärmeleistung:

Der auf den unteren Heizwert bezogene Wärmeinhalt des Brennstoffs, der einer Feuerungsanlage im Dauerbetrieb je Zeiteinheit zugeführt werden kann [VüK97].

Flüchtige Bestandteile:

Gasförmige Verbindungen, die unter festgelegten Bedingungen beim Erhitzen und Zersetzen organischer Brennstoffe entweichen.

Flugasche:

Bezeichnung für ein Verbrennungsprodukt vornehmlich aus Feststofffeuerungen, das von Verbrennungsgasen mitgeführt bzw. mechanisch mitgerissen wird oder beim Abkühlen aus dem Dampfzustand kondensiert.

Fraktionierung:

Stufenweise Trennung eines Stoffgemisches in seine Bestandteile (Fraktionen) durch verschiedene Trennverfahren (z. B. Extraktion, Sedimentation, Siebung, Flotation, Kristallisation).

Glühverlust:

Bezeichnung für die Gewichts-Differenz zwischen Abdampf- und Glührückstand bzw. zwischen Trockengewicht und Gewicht des Glührückstandes, je nachdem, ob man von flüssigen oder festen Stoffen ausgeht.

Grob- oder Rostasche:

Im Verbrennungsteil der Feuerungsanlage anfallende Asche, die neben der Brennstoffasche auch mineralische Verunreinigungen des Brennstoffs (z. B. Sand, Erde, Steine) enthält.

Hackgut:

Maschinell zerkleinertes Holz mit und ohne Rinde bis zu einer maximalen Stücklänge von 15 cm.

Heizkraftwerk:

Kraftwerk, das Strom und Nutzwärme erzeugt. Im Gegensatz zum Heizwerk, das nur Nutzwärme erzeugt.

Heizwert H_U (früher unterer Heizwert):

Als Heizwert (Symbol H_U) wird der Quotient aus der bei vollständiger Verbrennung einer bestimmten Brennstoffmenge freiwerdende Wärmemenge und der Masse dieser Brennstoffmenge bezeichnet, wenn das bei der Verbrennung gebildete Wasser dampfförmig vorliegt und wenn die Temperatur des Brennstoffes vor der Verbrennung und die Temperatur der entstandenen Produkte nach der Verbrennung den jeweils festgelegten gleichen Wert hat.

Holz-Briketts, -Pellets oder –Presslinge:

Holz-Briketts, -Pellets oder –Presslinge werden aus Schleifstaub und/oder Sägemehl durch mechanischen Druck hergestellt und dürfen keine chemischen Bindemittel enthalten.

Holzfeuchte:

Anteil des im Brennstoff enthaltenen Wassers, angegeben in Prozent der Masse, bezogen auf die Masse des wasserfreien Brennstoffes.

Immission:

Teil der Emission schädlicher Stoffe (Abgase aus Industrie, Straßenverkehr und Heizanlagen) sowie von Geräuschen, Erschütterungen, Gerüchen, Licht, Wärme und Strahlen, der auf Menschen, Tiere und Pflanzen sowie Sachgüter einwirkt.

Lignin:

Ein hochpolymerer, aromatischer Pflanzenstoff, der in verholzenden Pflanzen die Räume zwischen den Zellmembranen ausfüllt und zu Holz werden lässt (Lignifizierung bzw. Verholzung). Auf diese Weise entsteht ein Mischkörper aus druckfestem Lignin und zugfester Zellulose. Lignin ist noch an andere Polysaccharide (Polyosen) gebunden.

Maßeinheiten für Energie:

Nach dem Internationalen Einheitensystem (SI) ist "Joule" (J) die Einheit für Energie, Arbeit und Wärmemenge, "Watt" (W) die Einheit für Leistung, Energiestrom und Wärmestrom. Ein J ist definiert als Arbeit, die verrichtet wird, wenn der Angriffspunkt der Kraft 1 Newton (N) in der Richtung der Kraft um den Weg 1 m verschoben wird. 1 N ist dabei diejenige Kraft, die einem Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m je Quadratsekunde erteilt. Ein W ist definiert als Leistung, bei der während der Zeit von 1 Sekunde die Energie von 1 J umgesetzt wird. Damit ist das W identisch mit 1 J pro Sekunde (1 Joule = 1 Wattsekunde). Demzufolge stellt J diejenige Arbeit dar, die bei einer Leistung von einem W während einer Sekunde produziert und/oder verbraucht wird.

Naturl belassenes Holz:

Holz, das ausschließlich mechanischer Bearbeitung ausgesetzt war und bei seiner Verwendung nicht mehr als nur unerheblich mit Schadstoffen kontaminiert wurde [VüK97].

Nennwärmeleistung:

Die höchste von der Feuerungsanlage im Dauerbetrieb nutzbar abgegebene Wärmemenge je Zeiteinheit [VüK97].

pH-Wert:

Maßzahl für die basischen oder sauren Eigenschaften einer Lösung (pH 7 = neutral; <7 = sauer; >7 = basisch).

Pyrolyse:

Prozess der thermischen Zersetzung kohlenstoffhaltiger Abfälle unter Ausschluss von Sauerstoff bei Temperaturen um 500 °C (Niedertemperaturpyrolyse) bzw. 700 bis 900 °C (Hochtemperaturpyrolyse). Abfälle wie Kunststoffe, Gummi oder Altreifen werden in pyrolytischen Verfahren verwertet. Auch feste Biomasse kann einer Pyrolyse zugeführt werden. Als Rückstandsprodukt erhält man, abhängig von den Reaktionsbedingungen, Pyrolysekokse, -öle und -gase.

Regenerative Energie:

Energieträger und -formen, die sich ständig auf natürliche Weise erneuern.

Restholz:

Fällt in Sägewerken (Rinde, Vollholz, Sägespäne) und weiterverarbeitenden Betrieben (Sägespäne, Hobelspäne, Splitter, stückige Abfälle, Ausschuss, verunreinigte Abfälle) an.

Rinde:

Ummantelung des Holzkörpers eines Baumstammes.

Rundholz:

Holz, das sich durch Querschneiden von Stamm und Ästen ergibt.

Schüttraummeter:

Ein Kubikmeter Schüttgut (z. B. Hackgut, Sägespäne oder andere Granulate). Abkürzung: S-m³, Srm, SRm.

Schwermetalle:

Schwermetalle kommen in der Natur (Gesteine, Böden, Wasser, Pflanzen) nur in sehr geringen Konzentrationen vor. Die Quellen für die Schwermetall-Immissionen sind teils natürlichen Ursprungs (Vulkane, Verwitterung), teils anthropogen als Folge der Industrialisierung. Schwermetalle werden bei Verhüttungs- und Wärmegewinnungsprozessen, im Kraftfahrzeugverkehr, durch Korrosion technischer Bauwerke, im Bergbau und bei der Abfallbehandlung freigesetzt. In Böden können sich Schwermetalle durch Verwitterung, Immissionen und Abfallstoffe anreichern. Einige sind als Spuren- oder Mikronährstoffe für den Stoffwechsel von Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren essentiell. Andererseits entfalten zahlreiche Schwermetalle, nicht nur als elementarer Staub, sondern besonders in Form der löslichen Salze schon in sehr geringen Konzentrationen toxische Wirkungen. Als giftig gelten insbesondere Blei, Cadmium und Quecksilber.

Späne:

Späne fallen bei der Holzverarbeitung an und sind nur für spezielle Feuerungen geeignet.

Stamm:

Vom Wurzelstock getrennter, gezopfter und entasteter Schaft.

Staub/Partikel:

In der Luft verteilte feste Teilchen aus natürlichen oder vom Menschen zu verantwortenden Quellen. Feinstaub mit einer Teilchengröße unter fünf Mikrometern bleibt bis zu 14 Tagen in der Atmosphäre und kann in dieser Zeit über große Strecken transportiert werden.

Stückholz:

Für den Einsatz als Brennstoff aufbereitetes Holz

- kurzes Stückholz: Stücklänge über 15 cm bis ca. 50 cm
- langes Stückholz: Stücklänge über 50 cm bis ca. 100 cm.

Wassergehalt:

Anteil des im Brennstoff enthaltenen Wassers, angegeben in Prozent der Masse, bezogen auf die Masse des wasserhaltigen Brennstoffes.

Zellulose:

Zellulose (Cellulose) ist sowohl von der Menge als auch von ihrer Verbreitung her das häufigste und bedeutendste Biopolymer in der Natur. Zellulose ist ein wasser-unlösliches Polysaccharid der formalen Bruttozusammensetzung (C₆H₁₀O₅). Nahezu alle Zellwände der lebenden und abgestorbenen Pflanzenteile bestehen aus Zellulose; diese verleiht den

Pflanzen Festigkeit und macht sie gegen den Einfluss des Regens unempfindlich. Die Zellulose der verwesenden Pflanzenteile wird durch Bakterien und Pilze unter Aufbau körpereigener Stoffe zu Kohlenstoffdioxid und Wasser abgebaut.